

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program N2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
Zaměření strojírenské metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenská metalurgie

Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si

Cast iron with spheroidal graphite with a higher content of Si

Bc. Ondřej ŘÍDKÝ

KSP-SM-566

Vedoucí diplomové práce : Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant diplomové práce : Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	87
Počet obrázků:	78
Počet tabulek:	15
Počet vzorců:	10
Počet příloh:	1

25.5.2012

Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení strojírenská metalurgie

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Student: Bc. Ondřej Řidký
Téma práce : Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si
Cast iron with spheroidal graphite with a higher content of Si
Číslo DP: KSP-SM-566
Vedoucí DP: Prof. Ing. Iva Nová, Csc. – TU v Liberci
Konzultant: Ing. Jiří Machuta, Ph.D. – TU v Liberci

Abstrakt:

Tato diplomová práce je věnována litině s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si, jelikož tento materiál dle prvních prováděných výzkumů vykazuje vhodné mechanické vlastnosti. V našich slévárnách s tímto materiálem nejsou zkušenosti a přitom se jeví, jako perspektivní materiál pro automobilový průmysl. V první části diplomové práce jsou shrnuty poznatky o výrobě LKG s vyšším obsahem křemíku. Druhá část diplomové práce je experimentální a je zaměřena na stanovení technologie výroby na základě poznatků získaných z prováděných experimentů. Technologií výroby se rozumí složení vsázky, typ tavíciho zařízení, použité očkovadlo, způsob očkování, modifikace a vhodný modifikátor. Tak aby vzniklý materiál vyhovoval požadavkům.

Klíčová slova: Litina s kuličkovým grafitem a vyšším obsahem Si, modifikace, očkování, metalografické hodnocení, simulace, vsázka, tavíci zařízení

Abstrakt:

This thesis is devoted to spheroidal graphite cast iron with a higher content of Si, since this material as the first fruits of research has suitable mechanical properties. In our foundries with no experience of this material, yet it appears as a promising material for the automotive industry. In the first part of the thesis summarizes the findings on the production of ductile iron with a higher silicon content. The second part of this work is experimental and is focused on the production technology based on knowledge obtained from experiments carried out. Production technology means the charge composition, type of melting equipment, used an inoculant, the method of vaccination, modification and appropriate modifier. Thus the resulting material to suit the requirements.

Key words: Cast iron with spheroidal graphite and a higher content of Si, modification, vaccination, metallographic evaluation, simulation, batch, melting equipment

Místopřísežné prohlášení :

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovával samostatně za použití příslušné literatury.

V Liberci dne 25. května 2012

.....
Bc. Ondřej Řidký

Dopravní 989

463011 Liberec 30

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Ivě Nové, Csc. A Ing. Jiřímu Machutovy, Ph.D. za poskytnutí některých podkladů a cenných rad pro vyhotovení práce. Dále bych chtěl poděkovat slečně Anetě Pavlenkové za pomoc s překladem anglicky psaných podkladů k diplomové práci. Poděkování patří i panu Drahoslavu Vinšovy a Ing. Pavlu Pěničkovy, Ph.D. při provádění taveb. A za rady při práci v simulačním programu QUICK CAST bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Horáckovy. A symbolicky děkuji všem svým známým a přátelům, kteří mě podporovali při zhotovení diplomové práce.



OBSAH

1. ÚVOD	9
2.REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE.....	11
2.1 Grafitické litiny [11,13]	11
2.1.1. Rozdělení litin [1]	11
2.1.2. Vlastnosti grafitických litin [1].....	13
2.1.3. Litina s lupínkovým grafitem (LLG, dle ČSN 1563 - GJL) [1]	15
2.1.4 Litina s červíkovitým grafitem (LČG, dle ČSN 1563 - GJV) [1].....	16
2.1.5 Litina s kuličkovým grafitem (LKG, dle ČSN 1563 –GJS) [1].....	17
2.1.6 Temperovaná litina (TL) [1]	17
2.2. Soustava Fe-C-Si [1, 4, 10,12]	18
2.3. Tuhnutí a chladnutí odlitků z LKG [1, 3, 4, 10, 13,]	20
2.3.1. Vznik kuličkového grafitu	20
2.3.2. Stádia krystalizace [10].....	21
2.4. Vliv prvků na litinu s kuličkovým grafitem [3, 4 ,12, 14]	23
2.4.1. Základní prvky v litině s kuličkovým grafitem	23
2.4.2. Plyny v litině s kuličkovým grafitem.....	26
2.3.3. Modifikační prvky	26
2.5. Kovová matrice v litině s kuličkovým grafitem [3, 12].....	27
2.6 Tepelné zpracování litiny s kuličkovým grafitem [3, 7, 12]	31
2.7. Metalurgie litiny s kuličkovým grafitem [1, 10, 12].....	34
2.7.1 Tavicí zařízení.....	34
2.7.2 Vsázkový materiál	37
2.8. Příprava taveniny [1, 3, 4, 12, 14].....	37
2.8.1 Modifikace taveniny	37
2.8.1.2. Druhy modifikátorů.....	42
2.8.2. Očkování.....	43
2.8.2.1. Způsoby očkování	44
2.8.2.2. Druhy očkovadel	45
2.9. Výzkum ve Švédsku [8]	46
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	52
3.1 Příprava taveniny	52
3.2 Charakteristiku slévárenské formy.....	55
3.3 Odlévání a výroba zkušebních odlitků	56
3.4 Popis prováděných experimentů výroby odlitků	59
3.4.1. Metalografické hodnocení struktury odlitků.....	59
3.4.2. Měření tvrdosti.....	68



3.4.3. Sledování pevnosti v tahu	72
3.5. Simulační výpočet tuhnutí litiny s kuličkovým grafitem	76
3.5.1 Princip výpočtu	76
3.5.2. Provádění simulace v programu Quick CAST	77
4. DISKUZE ZJIŠTĚNÝCH VÝSLEDKŮ	83
5. ZÁVĚR	86
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	88



Přehled použitých zkratk

LLG – litina s lupínkovým grafitem
LČG – litina s červíkovitým grafitem
LKG – litina s kuličkovým grafitem
TL – temperovaná litina
GJL – litina s lupínkovým grafitem
GJV – litina s červíkovitým grafitem
GJS – litina s kuličkovým grafitem
 R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]
 $R_{p0,2}$ – smluvní mez kluzu [MPa]
 R_e – mez kluzu [MPa]
 ρ – hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
A – tažnost [%]
HB – tvrdost dle Brinella
 \bar{x} – odhad střední hodnoty
 $\bar{\sigma}$ – střední směrodatná odchylka
KVZ – kovy vzácných zemin
Sc – stupeň eutektičnosti
ADI – izotermicky zušlechtěné litiny s kuličkovým grafitem
 C_E – uhlíkový ekvivalent [%]
T – tavenina
A – austenit
G – grafit
F – ferit
P – perlit
B – bainit
 B_d – bainit dolní
 B_h – bainit horní
M – martenzit
Fáze α – ferit
Fáze γ – austenit
CV – vrubová houževnatost [J]
CV – nárazová práce [J]



1. ÚVOD

K nejvíce používaným materiálům v průmyslu patří železné slitiny, pro jejich dostupnost a užité vlastnosti. Mezi tyto železné slitiny patří grafitické litiny, které mají převážnou část uhlíku vyloučený ve formě grafitických útvarů. Tyto grafitické litiny mají dobré slévárenské vlastnosti a postupným zdokonalováním a vývojem nových technologií dosáhli vynikajících užitečných vlastností. V porovnání s ocelí mají některé vhodné vlastnosti, jako je obrobitelnost, lepší třecí vlastnosti, menší měrnou hustotu, nejdůležitější vlastností grafitických litin jsou útlumové vlastnosti a menší citlivost vůči vrubům. Litiny s kuličkovým grafitem, které byly vyvinuty po druhé světové válce, což byl velký milník ve vývoji grafitických litin. Litina s kuličkovým grafitem má srovnatelné mechanické vlastnosti s ocelí a současně výhody grafitických litin, tepelným zpracováním těchto materiálů se mění jejich matrice, což vede ke zvyšování mechanických vlastností a to jejich využití ještě rozšiřuje. V šedesátých letech započala výroba izotermicky zušlechťovaných litin s kuličkovým grafitem - ADI (Austempered Ductile Iron) v porovnání s ostatními grafitickými litinami dosahují pevností v tahu okolo 1400 [MPa] a dobrých plastických vlastností. Když k těmto vlastnostem přidáme vlastnosti grafitických litin, má tento materiál velký potenciál využití.

V poslední době se začaly v automobilovém průmyslu uplatňovat litiny s vyšším obsahem křemíku, obsah křemíku se pohybuje v rozmezí od 2,40 do 4,1[%]. Materiál nachází hlavní uplatnění u odlitků složitých tvarů a různou tloušťkou stěn což u běžných dosud používaných litin s kuličkovým grafitem znamená značný rozsah mechanických vlastností v různých místech odlitku. Proto se začal hledat materiál, který by nebyl náchylný na změny tloušťky a vykazoval téměř stejné vlastnosti ve všech místech odlitků. Jako vhodný se jevil takový materiál, který měl zvýšený obsah křemíku. Výzkumem této litiny se zabývali dva vědci L. E. Björkegren a K. Hamburg ze Švédska a výroba této litiny s kuličkovým grafitem a vyšším obsahem křemíku se řídila normou ISO 1083:2004. Tyto



litiny by do budoucna mohly v určitých případech nahradit dosud používané litiny EN-GJS 400-15 s mezí pevnosti 400 [MPa] a tažností 15 [%] a EN-GJS 500-7 s feriticko-perlitickou strukturou, pevností 500 [MPa] a tažností 7 [%].

V poslední době byla tato litina i odlévána na Technické univerzitě v Liberci v rámci vývoje materiálů prováděného při řešení výzkumného záměru MSM 4674788501. Také s tímto výzkumem souviselo řešení mé diplomové práce, které je na téma: „Litina s vyšším obsahem Si“.

Diplomová práce byla vytvořena s podporou projektu SGS - TUL-FS - 2822.



2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 Grafické litiny [11,13]

Obecně je definováno, že grafické litiny jsou slitinou železa (Fe), uhlíku (C), křemíku (Si), fosforu (P), síry (S) a popřípadě dalších prvků jako například mangan, měď, chrom atd., nesmíme zapomenout také na rozpuštěné plyny a nekovové vměstky. Obsah uhlíku v grafických litinách je vyšší než jeho maximální rozpustnost v austenitu což podle stabilního diagramu Fe-C odpovídá 2,11[%]. Toto platí pouze pro binární slitinu železo - uhlík, jak je obecně známo litina obsahuje i další prvky, a tyto prvky hodnotu rozpustnosti mění. Vliv některých prvků je ukázán v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Vliv prvků na body v diagramu Fe-C [11]

Prvek	Posuv eutektického bodu na 1% přísad [%C]	Rozsah platnosti do [%]	Posuv eutektické teploty na 1% přísad [°C]
Křemík	-0,31	5,5	+14
	-0,33	3	-21
S *	-0,36	0,4	
Mn *	+0,027	25	-8
Cr	+0,063	9	-6
Mo	-0,025	2	-10
V	+0,135	3,4	
Al	-0,25	2	
Cu	-0,074	3,8	+3
Ni	-0,053	8	+3

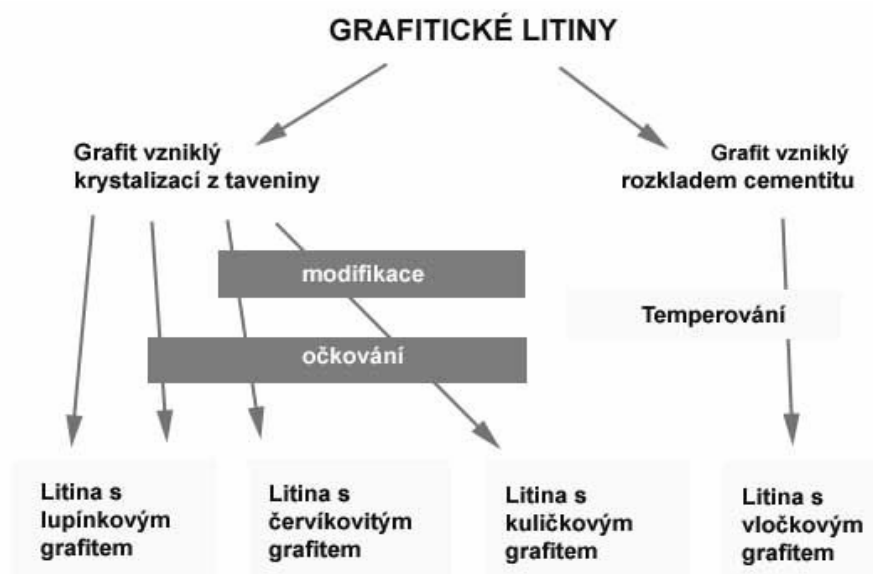
* pokud netvoří MnS

Litina se vyrábí přetavováním slévarenského železa, litinového vratu a ocelového šrotu a tavba se provádí v kuplovnách, rotačních plynových pecích, indukčních pecích eventuelně v obloukových pecích. Jaké zařízení použijeme záleží na druhu vyráběné litiny, a také na vybavení slévárny.

2.1.1. Rozdělení litin [1]

Rozhodujícím parametrem pro rozdělení litin je struktura eutektické krystalizace. U bílých litin probíhá krystalizace podle metastabilní soustavy Fe-Fe₃C a výslednou strukturou je ledeburit. Struktura těchto litin je pak tvořena volným cementitem (Fe₃C) a perlitem. Takto získané litiny jsou velmi tvrdé a křehké, mají dobrou otěruvzdornost, ale špatně se obrábí a mají relativně malou pevnost. Tato litina sloužila, jako základ pro

výrobu temperované litiny, která se získávala dlouhodobým tepelným zpracováním odlitků z bílé litiny, kde bylo podmínkou, aby bílá litina byla ve všech místech odlitku. Dnes se tato litina nahrazuje Litinou s kuličkovým nebo červíkovitým grafitem.



Obr. 2.1. Typy grafitických litin a jejich získání [3]

U grafitických litin probíhá eutektická krystalizace podle stabilní soustavy Fe-C a výsledkem je grafit, jehož tvar určí o jakou se jedná litinu. Takto vzniklý grafit v litině zůstává, bez ohledu na to jestli, další přeměny probíhají podle stabilní nebo metastabilní soustavy, tato přeměna ovlivňuje matrici těchto litin.

Když proběhne přeměna z části podle stabilní a z části podle nestabilní soustavy, vzniká tzv. přechodová litina eventuelně se jí říká „maková“ litina.

To zda bude přeměna probíhat podle stabilní nebo metastabilní soustavy záleží na několika faktorech, mezi rozhodující faktory patří:

S rostoucím množstvím uhlíku se podporuje vylučování podle stabilní soustavy.

Při pomalém ochlazování nám bude krystalizace probíhat podle stabilní soustavy, při rychlém ochlazení naopak bude krystalizace probíhat podle metastabilní soustavy.

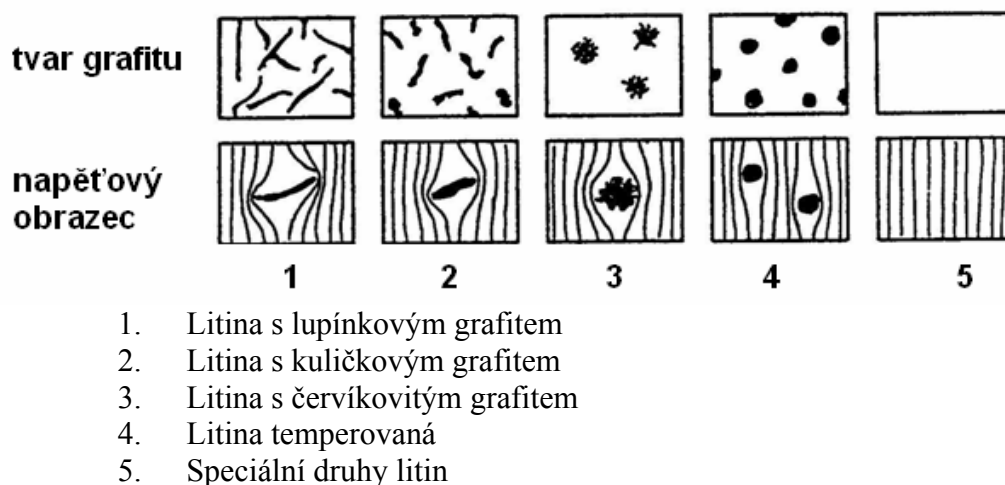
Obsahy dalších prvků vyskytujících se v litině dělíme na grafitotvorné (Si, Al) tyto prvky podporují eutektickou přeměnu podle stabilní soustavy a kardidotvorné (Mn, Cr, S, Mg) ,tyto prvky naopak podporují eutektoidní přeměnu dle metastabilní soustavy.

Grafit má velký vliv na vlastnosti litin, protože grafitické útvary v litině zmenšují její nosný průřez a tím vznikají místní koncentrace napětí, grafit v litině vzniká při

eutektické přeměně nebo tepelným zpracováním u TL. Je-li grafit produktem eutektické přeměny za podmínek stabilní rovnováhy, zůstává ve stejné podobě po zbytek doby nutné k do chladnutí odlitku a to nezávisle na tom, probíhají-li další změny podle stabilní nebo metastabilní rovnováhy. Grafit má minimální pevnost, proto vlastnosti litin nejvíce ovlivňuje jeho tvar a rozložení. Za normálních podmínek se grafit vylučuje ve formě lupínku, přidáme-li ovšem určité množství modifikátoru vzniknou nám jiné tvary než lupínek. Teoretický by jsme mohli získat celou řadu tvarů od lupínku až po dokonale kuličkový grafit. Prakticky chceme dosáhnout dvou typů a to červíkovitého a kuličkovitého grafitu.

2.1.2. Vlastnosti grafitických litin [1]

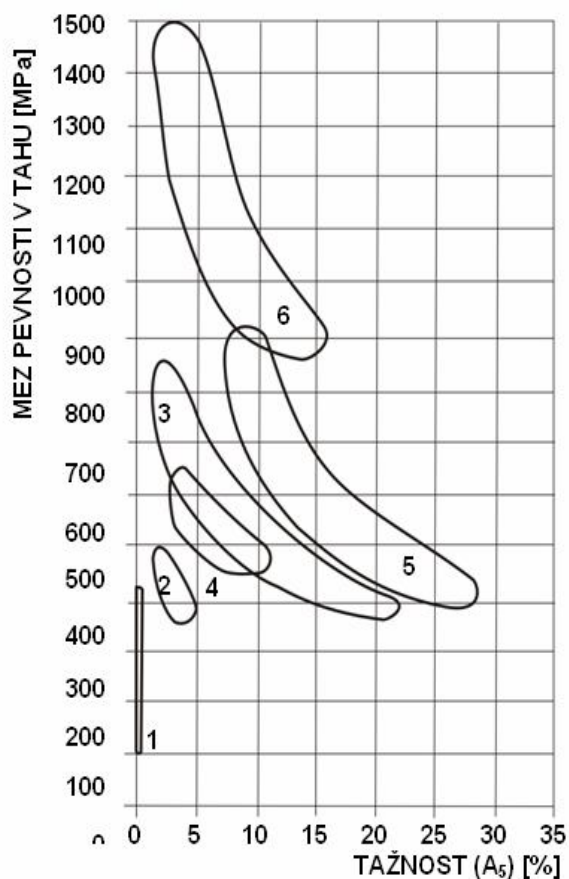
Jednak závisí na velikosti, tvaru a rozmístění grafitických útvarů, ale také na matici, ve které jsou útvary rozloženy. Matrice je převážně tvořena feritem, perlitem, popřípadě kombinací obou, u litin vyšší pevnosti je to pak sorbit. Občas matrice obsahuje po tepelném zpracování, nebo při legování určitým množstvím Ni, Mo a za daných podmínek chladnutí bainit. Běžně dosahované vlastnosti grafitických litin jsou znázorněny v diagramu a v tabulce 2.2.



Obr. 2.2 Vliv tvaru grafitu na rozložení napětí v materiálu [1]



- 1 - LLG
- 2 - LČG
- 3 - LKG
- 4 - TLP
- 5 - ocel na odlitky
- 6 - ADI (izotermicky kalená LKG)



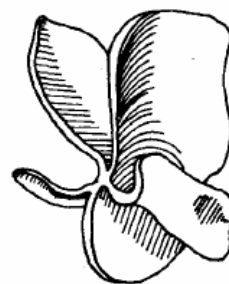
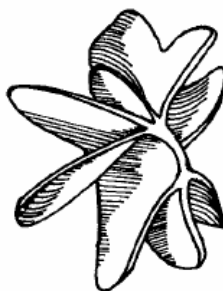
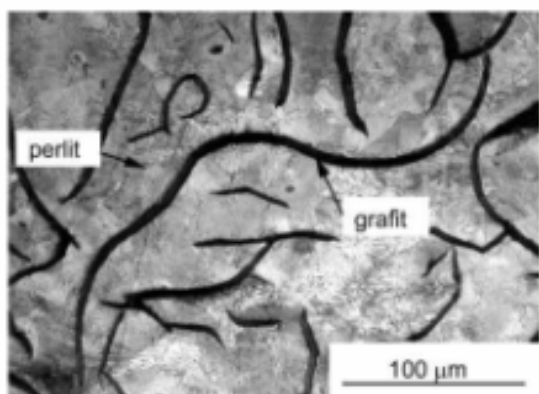
Obr. 2.3. Oblasti mechanických vlastností litin [1]

Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti jednotlivých typů litin [3]

Litiny	Feritická matrice	Feriticko-perlitická matrice	Perlitická matrice
Litina s lupínkovým grafitem	100-155HB Rm=100-200MPa	120-195 HB Rm=150-300MPa	145-215 HB Rm=250-350MPa
Litina s kuličkovým grafitem	Rm=350-400MPa A=15-22%	Rm=400-600MPa A=3-10%	Rm=600-900MPa A=2%
Litina s vermikulárním grafitem	Mechanické vlastnosti leží mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem.		
Temperovaná litina s bílým lomem	Rm=350- 550MPa A= 4-12% 200-250HB		
Temperovaná litina s černým lomem	Rm=350-800MPa A= 1-10% 140-320HB		

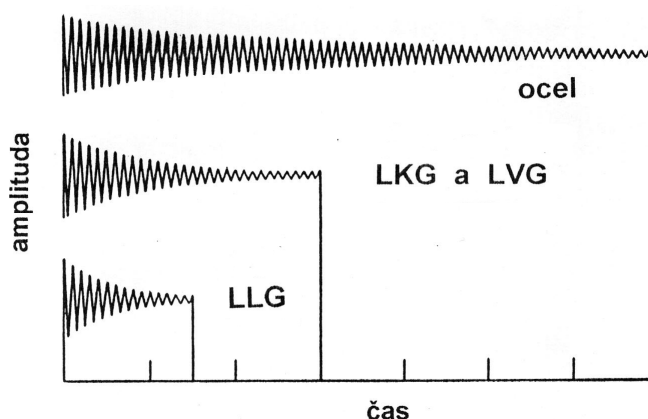
2.1.3. Litina s lupínkovým grafitem (LLG, dle ČSN 1563 - GJL) [1]

U tohoto druhu litin je grafit vyloučen ve formě grafitických útvarů, který je vidět na obrázku 2.4., na metalografických výbrusech je pak grafit vidět ve formě lupínků (Obr. 2.5.), délka těchto lupínků je podstatně větší než tloušťka a konce jsou ostré, proto tvoří ve struktuře značné vruby (Obr.2.2), pro konstrukční účely používají převážně litiny s podeutektickým a chemické složení se pohybuje kolem (2,8 až 3,6) % C, (1,4 až 2,8) % Si, (0,4 až 1) % Mn, (0,2 až 0,6) % P a max 0,15% S. Litiny eutektického a nadeutektického složení se využívají méně a to zejména, jako třecí materiálu díky velkým lupínkům grafitu. Využitelnost litiny ovlivňuje velikost a rozložení grafitového lupínku. Základní kovová hmota se vyžaduje většinou perlitická, z důvodů vyšších mechanických vlastností. Ferit ve struktuře snižuje pevnost a tvrdost, volný cementit naopak zvyšuje tvrdost a křehkost litin. U LLG se pevnost pohybuje v rozmezí 100 až 350 MPa, jejich tvárnost a tažnost je zanedbatelná, tvrdost je v rozmezí 180 až 270 HB. Pevnost v tlaku je obecně třikrát větší než pevnost v tahu. Pevnost v ohybu přibližně 1,5 až 2 krát větší než R_m . Modul pružnosti v tahu je v rozmezí 60 000 až 160 000 MPa, v závislosti na typu litiny a obecně se s rostoucí R_m zvětšuje. Nejdůležitější vlastností LLG jsou velmi dobré útlumové vlastnosti (obr 2.6) oproti ostatním materiálům, dále mají velmi dobré slévárenské vlastnosti a dobrou tepelnou vodivost a obrobitelnost.



Obr 2.4. (vpravo) Prostorový útvar grafitu v LLG [11]

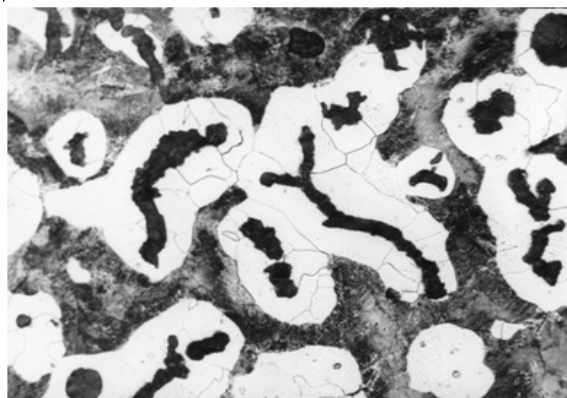
Obr 2.5. (vlevo) Metalografický výbrus LLG [3]



Obr 2.6. Útlumové vlastnosti železných materiálů [12]

2.1.4 Litina s červíkovitým grafitem (LČG, dle ČSN 1563 - GJV) [1]

Tyto litiny mají grafit vyloučen ve formě protáhlých prostorových útvarů, které jsou podobné grafitickému útvaru u LLG, ale mají větší poměr mezi výškou a délkou grafitického útvaru viditelném na výbruse. Konce těchto útvarů jsou zaoblené, proto nevytváří tak velké vrubové účinky. Podle tvaru grafitického útvaru se blíží vlastnostmi k LLG nebo LKG. Tento grafit vzniká nedokonalou modifikací Mg, Ce při výrobě LKG, popřípadě kombinací globulizačního prvku Mg a antiglobulizačního prvku Ti, nebo modifikací směsným kovem. Chemické složení se pohybuje kolem (3,5 až 3,8) % C, (2,4 až 3,0) % Si, do 0,6 % Mn , (0,02 až 0,06) %P a max 0,02% S. Pevnost v tahu LČG je 320 až 550 MPa a je závislá na matici a velikosti a rozložení grafitických útvarů, tažnost je v rozmezí (0,5 až 4,5)% tato hodnota záleží na tom zda se grafit podobá spíše lupínku nebo kuličce. Tyto litiny mají uplatnění tam, kde je potřeba kombinovat vlastnosti LKG a LLG, tato litina přebírá od LLG dobré slévárenské vlastnosti jako zabíravost, malý sklon ke vzniku staženin, malé smrštění a neposlední řadě útlumové vlastnosti. Od LKG přebírá vyšší pevnost a houževnatost. Tato litina se hodí pro dynamické a tepelné namáhání. Zahraniční firmy jí označují CGI (Kompakt graphit iron). Například výrobce nákladních automobilů Scania jí používá na výrobu bloky motorů pro nákladní automobily.



Obr. 2.7. (vlevo) Blok motoru scania V8 DC 1621 730 [15]

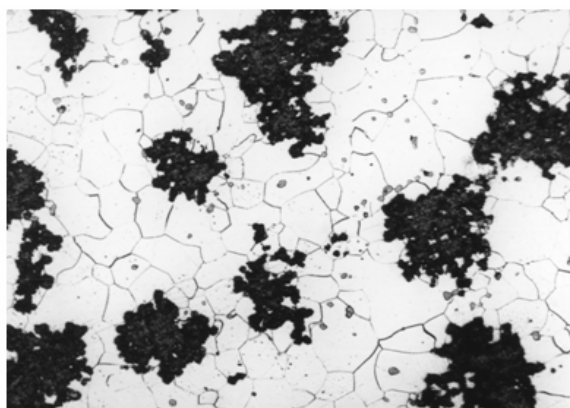
Obr. 2.8. (vpravo) Metalografický výbrus fericko-perlitické LČG [12]

2.1.5 Litina s kuličkovým grafitem (LKG, dle ČSN 1563 –GJS) [1]

V této litině je grafit vyloučen ve formě globulí (kuliček), tento tvar působí nejmenší vruby v materiálu. Dříve se tato litina označovala jako tvárná litina. Chemické složení těchto litin bývá obvykle (3,2 až 4,2)% C, (1,5 až 4,0)% Si, (0,2 až 0,8)% Mn, méně než 0,1 % P, max 0,02% S a (0,05-0,1)% Mg. Vznik kuličkovitého grafitu je způsoben modifikátorem (cér, hořčík), dnes se nejvíce používají předslitiny obsahující Mg, po modifikaci následuje očkování, jelikož hořčík podporuje tuhnutí podle metastabilní soustavy. Základní struktura těchto litin je feritická, perlitická nebo kombinace obou, po tepelném zpracování se vyskytuje ještě bainit a sorbit. Obecně litiny s kuličkovým grafitem dosahují dobré pevnosti a tvárnosti. S rostoucí pevností se jejich tvárnost zmenšuje.

2.1.6 Temperovaná litina (TL) [1]

Je to speciální druh grafitické litiny, od ostatních grafitických litin se liší tím, že pro její získání je zapotřebí zhotovit odlitek z bílé litiny, bílá litina musí být ve všech místech odlitku. Bílá litina má horší zabíravost a větší smrštivost než běžné grafitické litiny. To znamenalo, že její využití bylo omezeno na menší odlitky jednoduchých tvarů. Dnes je tato litina nahrazována LČG. Protože k získání temperované litiny je potřebné dlouhodobé tepelné zpracování, kdy dochází k rozpadu cementitu na grafit a perlit nebo ferit. Základní dělení těchto litin je na litinu s černým lomem, bílým lomem a perlitickou, Tyto litiny dosahují poměrně vysokých pevností 300 až 700 MPa. A tažnosti dle typu litiny 2 až 12 %.



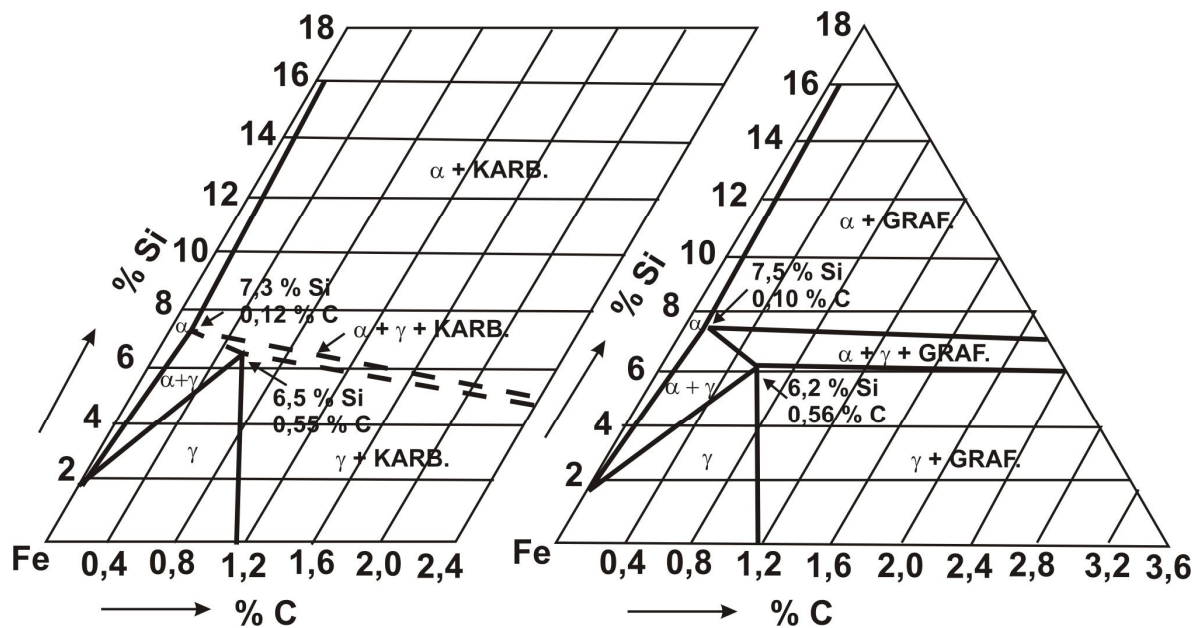
Obr. 2.9. Metalografický výbrus temperované litiny [12]

2.2. Soustava Fe-C-Si [1, 4, 10,12]

Grafitické litiny obsahují kromě Fe a C i další velmi významný prvek a tím je křemík Si, obsah křemíku se v litinách běžně pohybuje od 0,3 až 4,0 %, pro rozhodnutí zda budeme postupovat podle binární nebo ternární soustavy je rozhodující obsahu křemíku, hraniční hodnota je 2 %. Při obsahu pod tuto hodnotu neuděláme velkou chybu, když použijeme binární diagram, nad tuto hodnotu už však musíme použít ternární diagram. Proto si při krystalizaci litin nepostačí pouze s binární soustavou železo uhlík, ale musíme použít ternární soustavu Fe-C-Si, tato soustava se vyskytuje opět jako stabilní a metastabilní. Jelikož by orientace v ternárních diagramech byla složitá, používají se tedy diagramy pseudobinární, které jsou vlastně řezy ternárním diagramem. V těchto diagramech je vždy obsah jedné složky konstantní a ostatní dvě se mění. U krystalizace litin se používají ternární diagramy, kdy je jako konstantní zvolen obsah křemíku a obsahy uhlíku a železa jsou proměnné. V metastabilní soustavě je uhlík vázaný ve formě Fe_3C , tento karbid neobsahuje žádný křemík. Ve stabilní soustavě je uhlík přítomen ve formě grafitu a křemík se rozpouští ve feritu a tvoří tuhý roztok, někdy se tento tuhý roztok označuje jako silikoferit. Pro odlévání je důležitý uhlíkový ekvivalent C_E , tento ekvivalent zahrnuje efekt křemíků. Nejrozšířenější vztah pro výpočet je (2.1). Z tohoto vztahu vyplývá, že křemík má přibližně 3 krát vyšší grafítizační schopnost než uhlík.

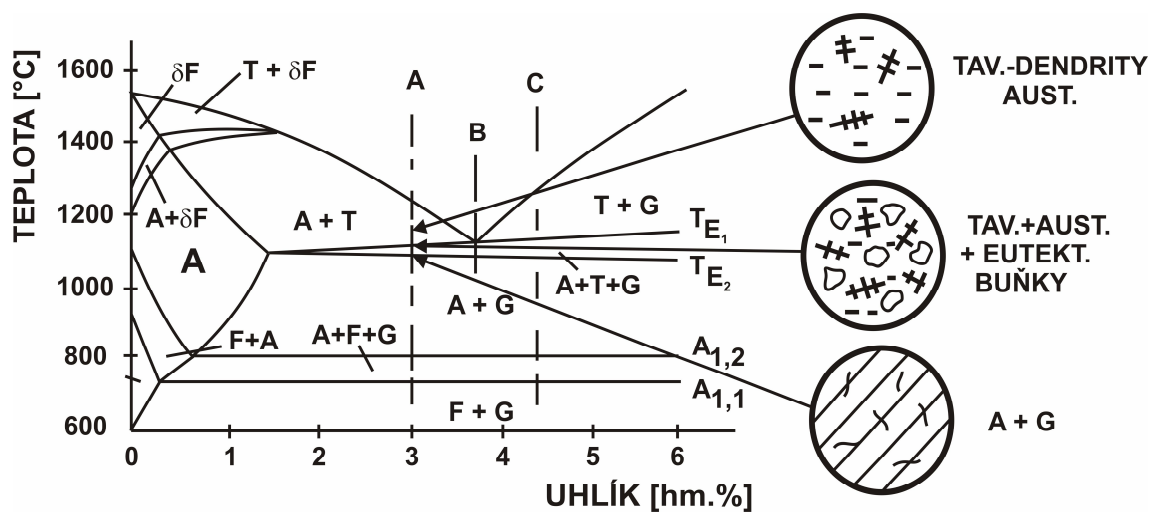
$$C_E = C + 0,3\% \text{Si} \quad (2.1)$$

V terciární soustavě se už nevyskytuje jedna konstantní eutektická teplota, ale interval teplot $T_{E1} - T_{E2}$. Eutektoidní přeměna probíhá v teplotním intervalu $A_{1,1} - A_{1,2}$. Interval eutektoidních i eutektických teplot se rozšiřuje s vzrůstajícím obsahem křemíku (obr. 2.12.)

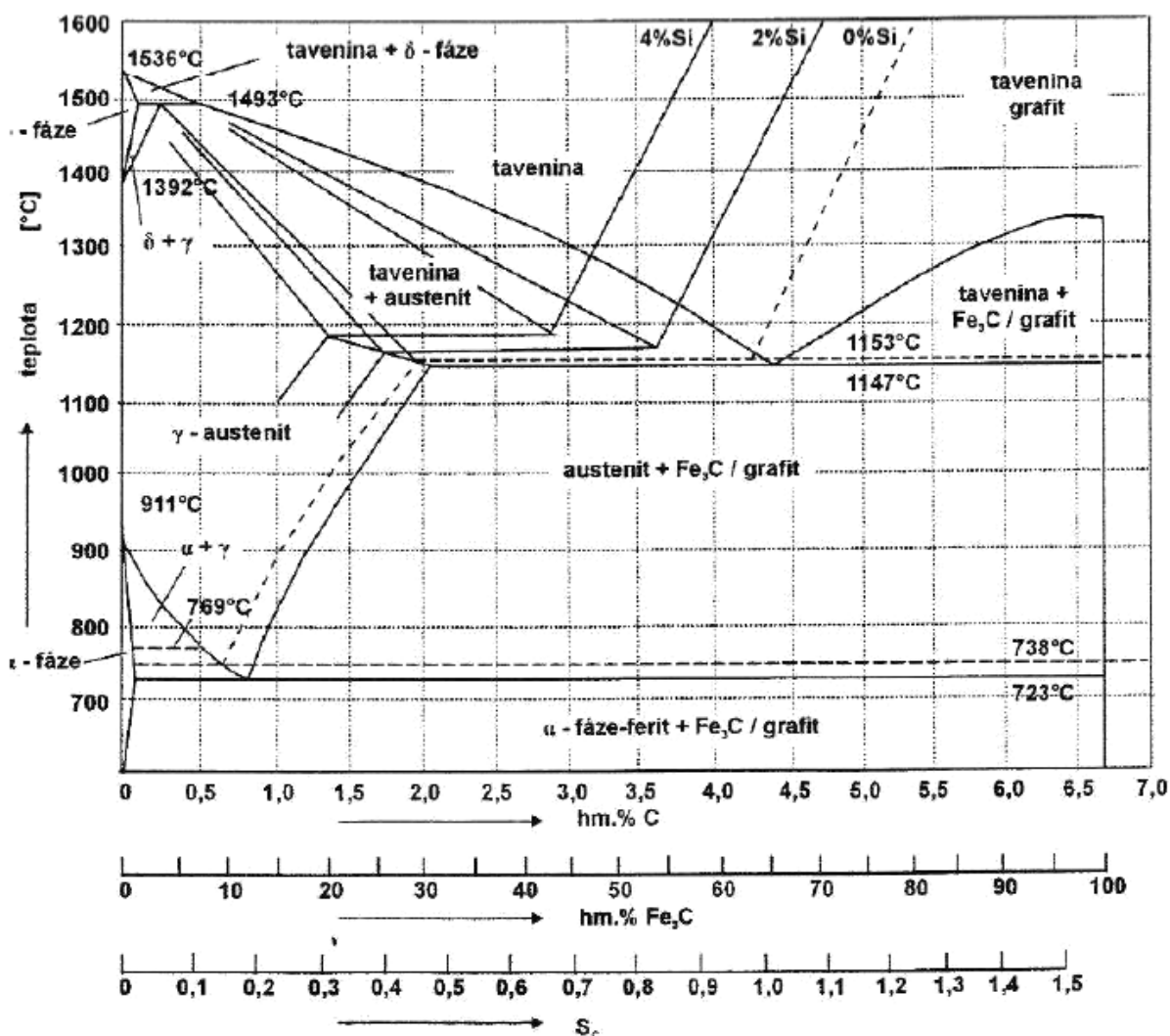


Obr. 2.10. (vlevo) Metastabilní ternární diagram Fe-C-Si [4]

Obr. 2.11. (vpravo) Stabilní ternární diagram Fe-C-Si [4]



Obr. 2.12. Pseudobinární rovnovážný diagram Fe-C-Si (2 % Si) [1]



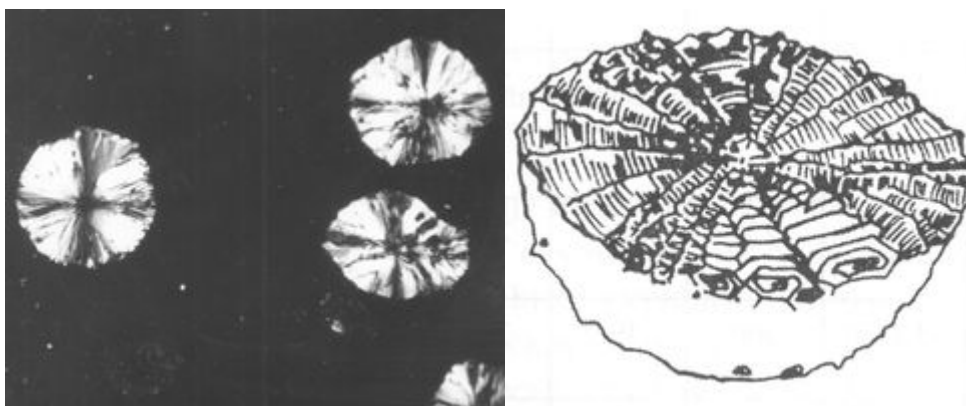
Obr. 2.13. Pseudobinární diagram Fe-C s konstantním obsahem Si [4]

2.3. Tuhnutí a chladnutí odlitků z LKG [1, 3, 4, 10, 13,]

2.3.1. Vznik kuličkového grafitu

Pro pochopení, jak kulička vzniká byli nutná pozorování křivek chladnutí a metalografické výbrusy. Bylo provedeno množství zkoušek a pokusů, ale výsledky byli spíše subjektivní a proto je několik hypotéz. K tvorbě kuličky je potřeba kromě uhlíku i dalších prvků obsažených v litině, kterými jsou kyslík a síra, abychom snížili obsah těchto prvků musíme přidat vhodné prvky, které sníží jejich obsahy na minimum. Tyto prvky tvoří velmi stálé sloučeniny s kyslíkem a sírou, a jsou součástí modifikátoru (Mg, Ce, Ca, Li, Al, La Ba, K, Na). Vzniklé sloučeniny tvoří vhodné zárodky, které podporují vylučování částic SiO_2 a přitom působí na grafit tak, že neroste ve formě lupínku,

předpokládá se, že vytváří napětí na rozhraní grafit-tavenina, a tak nutí růst grafit do energeticky nejvýhodnějšího tvaru a tím je koule. Dalšími vlivy na vznik kuličkového grafitu je čistota taveniny a rychlost ochlazování, to znamená, že taveninu musíme dostatečně přechladit. Zrnitý grafit nukleuje přímo z taveniny a vytváří sfelity vyrůstající ze společného zárodku. Jakmile dojde k vytvoření zárodku, dochází k jeho růstu konstantně ve všech směrech a tavenina se ochuzuje o C. Vlivem sníženého obsahu C se tavenina silně konstitučně podchladí a vznikne austenitická obálka okolo zrna grafitu, její tloušťka je ovlivňuje rychlostí tuhnutí. Při pomalém ochlazování difunduje uhlík i ze vzdálenější taveniny a austenitická obálka se vytvoří později, tím pádem jsou zrna větší. Současně s modifikací musíme i očkovat. Očkování totiž potlačuje karbidotvorné účinky modifikátoru a vytvoří vhodné částice (SiO_2) pro vznik zárodků grafitu. Zárodky pro růst kuličkového grafitu se skládají ze dvou částí a to z jádra a obalu. Jádro je tvořeno stabilním sulfidem CaS , CeS a MgS . Obálka jádra je tvořena komplexními oxidy, nejčastěji MgO.SiO_2 a 2MgO.SiO_2 , popřípadě dalšími, které tvoří poslední vrstvu CaO.SiO_2 , $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$, BaO.SiO_2 , SrO.SiO_2 a dalšími. Proto aby zárodek byl vhodný pro růst kuličkového grafitu musí mít podobnou mřížku a být přítomné v tavenině v tuhém stavu.



Obr. 2.14. (vlevo) Zrna grafitu v tvárné litině [3] Obr. 2.15. (vpravo) Strukturní model [3]

2.3.2. Stádia krystalizace [10]

U LKG se při tuhnutí objevují tři hlavní stádia a to vylučování primární fáze z taveniny, a to i u eutektické přeměny, vysvětlení je uvedeno níže. Poté následuje eutektické přeměna a tuhnutí končí eutektoidní přeměnou.

Tuhnutí začíná vylučováním primární fáze z taveniny a grafit vyrůstá na vhodných zárodcích obsažených v tavenině. Zárodek z grafitem k sobě přitahuje uhlík z okolní taveniny a vytěsňuje železo a další prvky do taveniny. Díky tomu se oduhličená oblast



konstitučně podchladí a tím se vytvoří kolem zrna obálka, která je obohacena o grafitotvornými prvky.

Za eutektické teploty dosáhne uhlík maximální rozpustnosti v austenitu, je v rovnováze s taveninou a probíhá eutektická přeměna, při které se tvoří buňky stabilního eutektika a ve středu těchto buněk roste zrno grafitu. Tato vznikající směs se nazývá grafitické eutektikum. Poté nastává další fáze eutektické krystalizace, kdy je růst grafitu velmi pomalý, protože grafit musí difundovat z taveniny přes austenitovou obálku, která se tím pádem zvětšuje pomaleji, utvoří-li se málo grafitických zárodků a zrna jsou daleko od sebe. Nastává další fáze krystalizace, při které austenitická obálka rychle roste a to má za následek, že austenit se obohacuje o grafitizační prvky a tavenina o karbidické. Po ukončení eutektické překrystalizace dochází k dalšímu ochlazování a dochází k přeměně matrice v intervalu mezi eutektickou a eutektoidní teplotou. V této oblasti se vylučuje sekundární grafit z austenitu a připojuje se k primárnímu nebo eutektickému grafitu.

Při pozorování křivek chladnutí se projeví nejviditelněji eutektické přeměny, která je vlivem zvýšeného obsahu Si v intervalu teplot nikoliv za konstantní teploty, pro nastartování eutektické přeměny je potřebné určité podchlazení. Proto abychom věděli, jak bude litina tuhnout musíme určit S_C . To nám určí zda tavenina bude tuhnout jako podeutektická ($S_C < 1$) nebo naeutektická ($S_C > 1$). Bylo totiž zjištěno že tavenina o eutektickém ($S_C = 1$) i lehce nadeutektickém složení tuhne jako by byla podeutektická. Předpokládá se, že je to způsobeno teplotním intervalem eutektické přeměny. Aby k tuhnutí došlo musíme taveninu podchladit, to jak velké bude podchlazení nejvíce ovlivňuje materiál formy a tloušťka stěny. Velikost podchlazení je jeden z důležitých údajů proto zda litina bude tuhnout jako grafitická nebo bílá, další ovlivňující faktory jsou chemické složení a nukleační stav taveniny. Při pozorování křivek chladnutí můžeme vidět po podchlazení určitý vzestup teploty, tento jev se nazývá Rekalascence je následkem tuhnutím dvou fází (grafit, austenit), při vytváření obou fází se uvolňuje teplo. Projevuje se pouze u silnostěnných odlitků.

$$S_C = \frac{\%C + 0,31\%Si}{4,3} \quad (2.2.)$$

Tuhnutí litin podeutektického složení začíná vylučováním rozvětvených krystalů austenitu (dendrity) při růstu těchto krystalů dochází při odebrání tepla, až se dosáhne hranice eutektické přeměny, po překročení této hranice o určitý stupeň přechlazení dochází k současnému vylučování grafitu a austenitu, austenit vytváří kolem grafitu obálku. Takto



vzniklé útvary se navzájem propojují a spojují se také s okolními dendrity austenitu. Náhodným rozdělením těchto útvarů vznikají autektické buňky obklopené taveninou. Tím se tavenina ochuzuje o uhlík a hranice jsou bez grafitu.

Tuhnutí nadeutektické litiny je typické primárním vylučováním kuliček grafitu, které jsou rozptýlené v tavenině (pokud má odlitek velké tloušťky stěn může dojít k flotaci grafitu, tzn. nahromadění kuliček grafitu v horní partii odlitku). Klesne-li teplota pod hranici eutektické přeměny začnou se vylučovat současně útvary, které obsahují kuličku grafitu uprostřed a jsou obklopeny eutektickými buňkami (eutektická buňka je grafit obklopený austenitovou obálkou). Tyto buňky narůstají po vrstvách a to ve směru kolmém k odvodu tepla. Díky tomuto jevu dochází k rovnoměrnému rozložení grafitu. Po vytvoření první vrstvy buněk je zbylá tavenina ochuzena o uhlík a vytváří se vrstva bezgrafitického austenitu. Vrstveným tuhnutím dochází k tomu že nakonec tuhne bezgrafitická fáze, která může obsahovat vysegregované prvky, jako například karbidy a vměstky a takto tvořené hranice eutektických buněk nepříznivě působí na mechanické vlastnosti. Proto se nadeutektické složení nehodí pro silnostěné odlitky (tloušťka stěny nad 38 mm), ale pro tenkostěnné odlitky, kde probíhá rychlé chladnutí a nedochází k segregaci.

V teplotním intervalu též probíhá eutektoidní přeměna, kdy se austenit mění buď na ferit, to je podle stabilního rovnovážného diagramu a nebo na perlit podle metastabilního diagramu. Poměrně často, ale nastává kombinace, že nejdříve probíhá přeměna podle stabilního diagramu a po určitém čase pak podle metastabilního. Tím nám vznikne feriticko perlitická matrice. Na metalografických výbrusech je vidět, že pokud má litina ve struktuře ferit a perlit, tak ferit vždy obklopuje zrna grafitu, je to způsobeno tím, že obálka obklopující zrno grafitu je odhličována. Karbidy jsou vytlačovány do okolní taveniny a křemík zůstává v austenitické obálce.

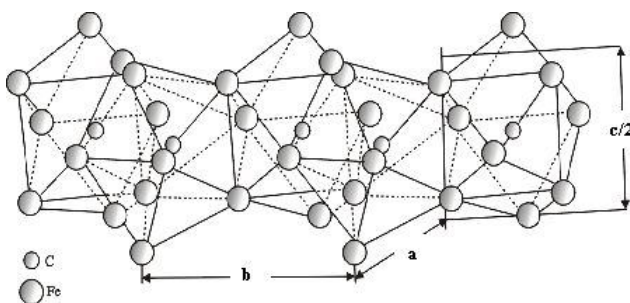
2.4. Vliv prvků na litinu s kuličkovým grafitem [3, 4, 12, 14]

2.4.1. Základní prvky v litině s kuličkovým grafitem

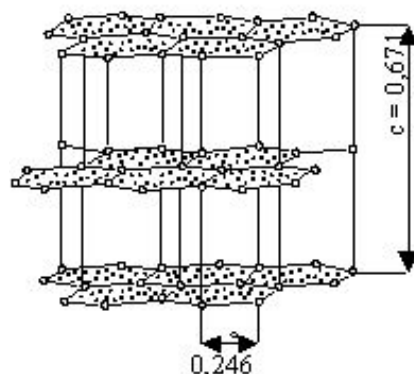
Přísadové prvky se dělí v litinách na žádoucí a nežádoucí. Žádoucími prvkům se říká legury a používají se na zlepšení vlastností materiálu, například pevnosti, tvrdosti, zvýšení odolnosti za vyšších teplot. Dále ale litina obsahuje prvky nežádoucí, jako je síra a fosfor, jejichž obsah se snažíme v litině snížit na minimum, jelikož negativně ovlivňují její vlastnosti. Při přípravě litiny s kuličkovým grafitem si musíme dávat pozor na prvky

antiglobulizační (Ti, Pb, As, Sn), tyto prvky působí proti tvorbě zrnitého grafitu. Proto je obsah těchto prvků velmi hlídán jejich povolené množství jsou tisíciný až setiny %. Dále se v litinách vyskytují i plyny (O_2 , H, N) a nekovové městky (struska, vyzdívka z pecí).

Uhlík C má ze všech prvků největší vliv na vlastnosti železa, je přítomen, jako intersticiálně umístěn prvek, nebo se ve struktuře vyskytuje, jako chemická sloučenina Fe_3C , u litin je vyloučen v čisté podobě jako grafit. Grafit krystalizuje v šesterečné soustavě, jeho teplota tavení je okolo $3700^\circ C$, měrná hmotnost je 2200 kg/m^3 . Tvrdost a pevnost jsou zanedbatelné. Při vyšším obsahu v litině působí příznivě na její slévárenské vlastnosti a podporuje grafitizaci. Volný uhlík v litině ve formě grafitu kompenzuje smršťování při tuhnutí odlitku a tím má vliv na malé smršťování litin, čím litina obsahuje více grafitu tím méně smršťuje.



Obr. 2.16. (vlevo) Krystalická mřížka cementitu (Fe_3C) (vlevo) [3]



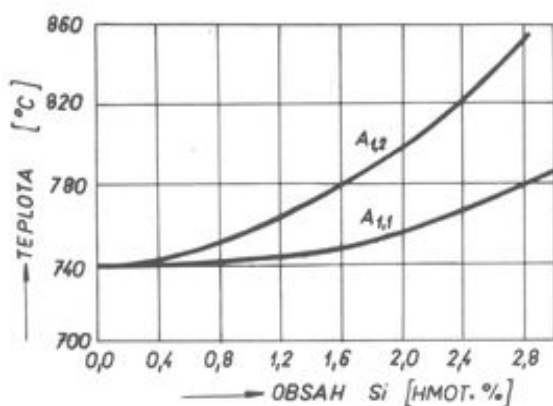
Obr. 2.17. (vpravo) Krystalické mřížka grafitu [3]

Křemík Si je v litinách po uhlíku druhou nejdůležitější přísadou a je při výrobě litin nepostradatelný. Významně modifikuje její vlastnosti. Je to grafitizační prvek, který se rozpouští ve feritu, kde nahrazuje atomy železa ve struktuře. Výrazně zlepšuje slévárenské vlastnosti, jako je tekutost a snížení teploty tavení, ale zvyšuje sklon k tvorbě bublin, trhlin a pórů. Působí jako deoxidér ($Si + O_2 \rightarrow SiO_2$), vázaný kyslík je nutný pro správný průběh modifikace. Takto vázaný kyslík se při vysokých teplotách redukuje pomocí uhlíku na oxid uhelnatý. Platí dvě rovnice, to která bude převládat ovlivňuje teplota a koncentrace křemíku a uhlíku. S rostoucím obsahem křemíku klesá rozpustnost uhlíku v austenitu a zvyšuje se pevnost matrice. Hlavní nevýhodou zvýšeného množství křemíku v LKG je zvýšení tranzitní teploty a tím podporuje vznik křehkého lomu. Jak je patrné z grafu, křemík má vliv i na teplotu eutektoidní přeměny, s rostoucím obsahem Si již není

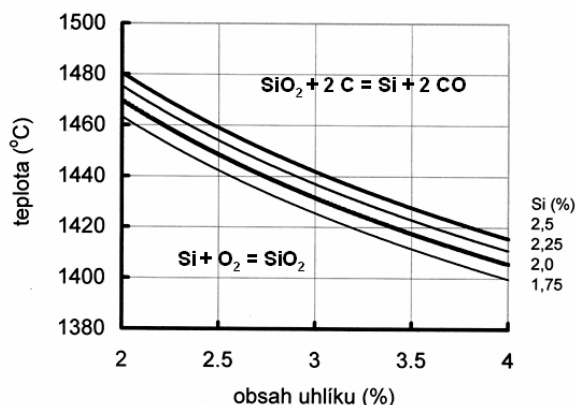


eutektoidní přeměna za konstantní teploty, ale v intervalu teplot $A_{1,1}$ a $A_{1,2}$ a navíc se posouvá k vyšším hodnotám. Má také vliv na eutektickou přeměnu, kdy opět přeměna neprobíhá za konstantní teploty, ale v intervalu teplot. Obsah křemíku obsaženém ve vsázce pro docílení požadované koncentrace se zjistí vztahem (2.3)

$$Si_{\text{vsázky}} = Si_{\text{odlitku}} + Si_{\text{propal}} - Si_{\text{očkován}} - Si_{\text{modifikace}} \quad (2.3)$$



Obr. 2.18. (vlevo) Vliv Si na polohu a interval eutektoidních teplot [3]



Obr. 2.19. (vpravo) Rovnovážná teplota uhlíkové reakce[14]

Mangan Mn je to karbidotvorná složka, protože má větší afinitu k uhlíku než železo. A potlačuje tvorbu grafitu, ale kompenzuje negativní vliv křemíku. Mangan má tendenci snižovat kritickou teplotu a obsah uhlíku v eutektiku. Váže na sebe síru a tím taveninu odsiřuje, MnS. Při odlévání zlepšuje tekutost taveniny a homogenitu odlitků. Mn zvyšuje dispersitu perlitu a tím zvyšuje jeho pevnost a odolnost vůči otěru. S rostoucím obsahem Mn je litina křehká a tvrdá a dochází ke snížení pevnosti a tažnosti, významný pokles pevnosti nastává při obsahu vyšším jak 0,6 % Mn a to hlavně za vyšších teplot. Při menším obsahu naopak zvyšuje tažnost a rázovou houževnatost za nízkých teplot. Vliv manganu souvisí s jeho nerovnoměrným rozložením v matici. Nachází se totiž na hranicích eutektických buněk, které jsou navíc bohaté na uhlík. Mangan vysokém obsahu snižuje rychlost banické přeměny a to zejména za teplot okolo 400°C.

Měď Cu v množství 0,5 až 1,5 % se používá ke stabilizaci perlitu, chceme-li dosáhnout feritické struktury. Je potřeba udržet obsah mědi pod 0,03 %, při obsahu nad 3% Cu zvyšuje tažnost po izotermickém zpracování za teplot mezi 300°C až 350°C. Dále zabraňuje tvorbě bainitických karbidů, a její vliv na zbytkový austenit je minimální.

Síra S stabilizuje cementit, zlepšuje smrštivost odlitku, ale zhoršuje homogenitu odlitku. Dále zvyšuje tvrdost a způsobuje lámavost litin za tepla. Proto se síru snažíme



z litiny odstranit, nebo eliminovat její účinek například vazbou MnS. Kvalitní litiny kuličkový grafitem by měli mít obsah síry pod 0,01% S.

Fosfor P stabilizuje cementit, zvětšuje interval tuhnutí, zlepšuje tekutost a proto se LLG s obsahem kolem 2% používají pro odlévání uměleckých odlitků. Fosfor zlepšuje odolnost vůči otěru a zvyšuje tvrdost a křehkost, protože vytváří tvrdé sloučeniny Fe_3P . Fe_3P tvoří ternární eutektikum o složení Fe- Fe_3C - Fe_3P , nazývaný se steadit. Dále fosfor snižuje odolnost při dynamickém namáhání a snižuje koncentraci uhlíku v eutektickém bodě. V LKG s vyšším obsahem Si je nežádoucím, protože snižuje tažnost litiny. Jeho množství by proto mělo být co nejnižší alespoň pod 0,08%.

2.4.2. Plyny v litině s kuličkovým grafitem

V tavenině LKG je rozpuštěno určité množství plynů, jejich obsah by měl být sledován a neměl by přesahovat normou povolené množství. Některé plyny v tavenině potřebujeme, proto aby mohly proběhnout metalurgické děje, a bylo tak dosaženo výsledné struktury.

Kyslík O_2 se z taveniny dostane pomocí desoxidátorů, neúčinnějším je Mg. Tím se obsah kyslíku sníží na 0,005 %. Určité množství kyslíku je totiž potřeba pro vznik krystalizačních zárodků. Kyslík totiž reaguje s prvky očkovačla a modifikátoru a vytváří komplexní oxidy, které jsou nutné pro vznik nukleárních zárodků. Vyšší obsah kyslíku podporuje vznik červíkovitého grafitu.

Vodík H silně stabilizuje karbidy, proto se jeho množství musí být sledováno, aby se dalo opakovaně dosáhnout požadované struktury.

Dusík N v podobě molekuly N_2 se dá použít jako odplyňující a čistící činidlo bez vedlejších účinků. Účinek dusíku je zanedbatelný pod obsah 0,009%, při vyšších hodnotách stabilizuje perlit a mohou vznikat nitridy. Předností dusíku je zjemňování grafitu.

2.3.3. Modifikační prvky

Hořčík Mg je to velmi reaktivní kov, jeho teplota varu je 1107 °C, tato teplota je asi o 300 až 400 °C nižší než je teplota taveniny při modifikaci. Tím pádem jeho množství v tavenině s dobou udržování taveniny na lici teplotě klesá. Obsah zbytkového hořčíku se pohybuje od 0,02 až 0,08 %Mg v závislosti na obsahu síry a na požadované struktuře.

Cér a KVZ, cér je velmi účinný desoxidér a odsířovač, ale na rozdíl od Mg má teplotu varu 2406 °C, díky tomu není jeho reakce bouřlivá jako při modifikaci Mg. Oxidy a sulfidy, které vznikají jsou stabilní a opětovně se v tavenině již nerozpouští. Při vysokém



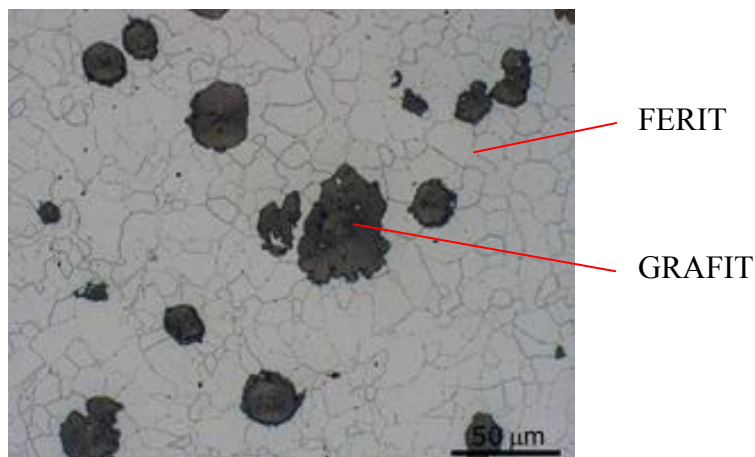
obsahu KVZ u tlustostěnných a pomalu chladnoucích částí odlitku dochází k flotaci grafitu. To má za následek nahromadění grafitických kuliček v horních partiích odlitku a vznik explodovaného grafitu. V tepelných uzlech se může vyskytnout chunky grafit. Vysoká cena KVZ vede k tomu, že se používají ve formě mischmetallu, nebo jako součást hořčíkových předslutin. Pro zvýšení počtu kuliček, popřípadě vyrušení škodlivého vlivu antiglobulizačních prvků (Pb, Ti, Bi, Sb, As).

Vápník Ca je přidáván v množství 0,2 až 3,5 %Ca do modifikátorů hořčíkových předslutin, kde výrazně snižuje bouřlivou reakci Mg. Zvyšuje počet kuliček a zvyšuje účinek očkování. Použití samotného Ca, jako modifikátoru je nepraktické, protože vytváří strusku.

2.5. Kovová matrice v litině s kuličkovým grafitem [3, 12]

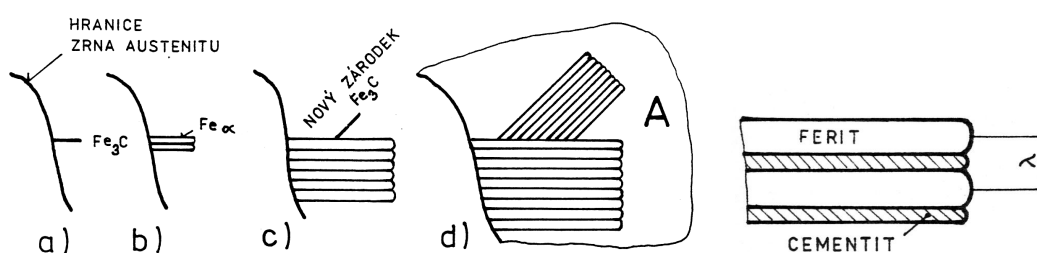
Struktura základní kovové hmoty závisí na chemickém složení litiny, rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí, stavu krystalizačních zárodků a na tepelném zpracování.

Ferit vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního schématu. Přísadový prvek křemík a pomalé ochlazování podporuje vznik feritu. Ferit je měkký, tvárný, dobře obrobitelný a houževnatý. Na jeho vlastnosti mají značný vliv legury a doprovodné prvky, které se železem tvoří substituční tuhé roztoky. Všechny přísadové prvky v litinách zvyšují tvrdost a pevnost feritu. Některé přísadové prvky a legury, například Ni, Mn, Cr zvyšují houževnatost a naopak Si houževnatost feritu snižuje. Vzhled feritu na metalografických výbrusech je vidět na obr. 2.20. Získání čistě feritické struktury je možné velmi pomalým ochlazováním, nebo tepelným zpracováním, popřípadě zvýšeným obsahem křemíku. Takto získaný ferit je tvrdší a má posunutou tranzitní teplotu, takže za nízkých teplot je křehký a hrozí vznik křehkého lomu.



Obr. 2.20. LKG s matricí feritickou [3]

Perlit je eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního schématu. Z jednoho zrna austenitu obvykle vzniká několik zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel (obr. 2.21). Vznik perlitu podporuje měď a jiné karbidické prvky, jako Cr, Mn a další. Obsah cínu přibližně do 0,15% vede ke stabilizaci perlitu a zvyšuje jeho hustotu, stejně tak i velmi malé množství dusíku. Oproti feritu má perlit vyšší pevnost a tvrdost, ale horší plastické vlastnosti, horší obrobitelnost a vyšší odolnost proti opotřebení. Vlastnosti perlitu závisí na hustotě dané jeho dispersitou λ (obr.2.21), čím je hustota lamel feritu a cementitu hustší, tím vyšší mechanické vlastnosti perlit má. Vzhled perlitu na metalografických výbrusech je vidět na obr. 2.22.

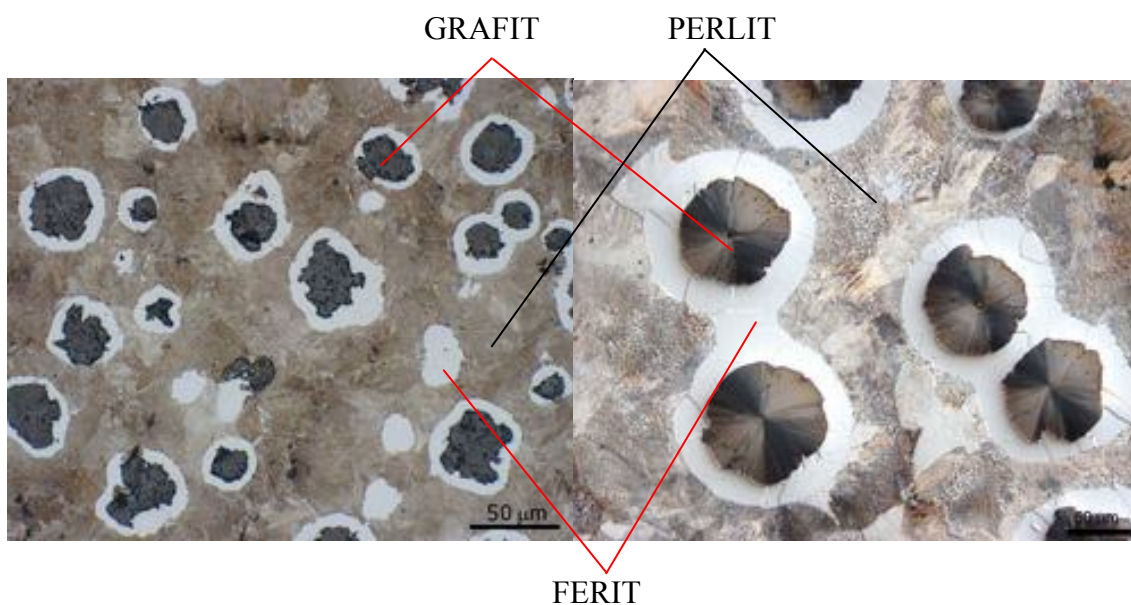


Obr. 2.21. Dispersita perlitu [12]

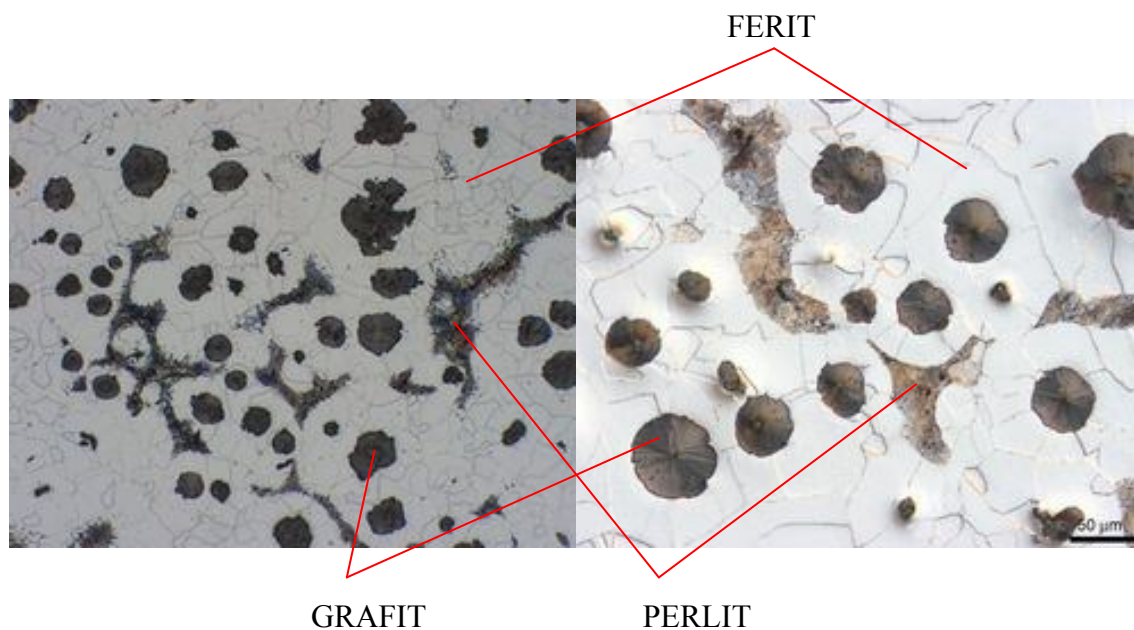


Obr. 2.22. LKG s matricí perlitickou [3]

U některých druhů litin s kuličkovým grafitem se ve struktuře vyskytuje perlit a ferit v různém poměru. Tyto litiny mají matrici feriticko-perlitickou (obr. 2.24), a nebo perliticko-feritickou (obr. 2.23), záleží na tom, zda-li převažuje ferit či perlit.

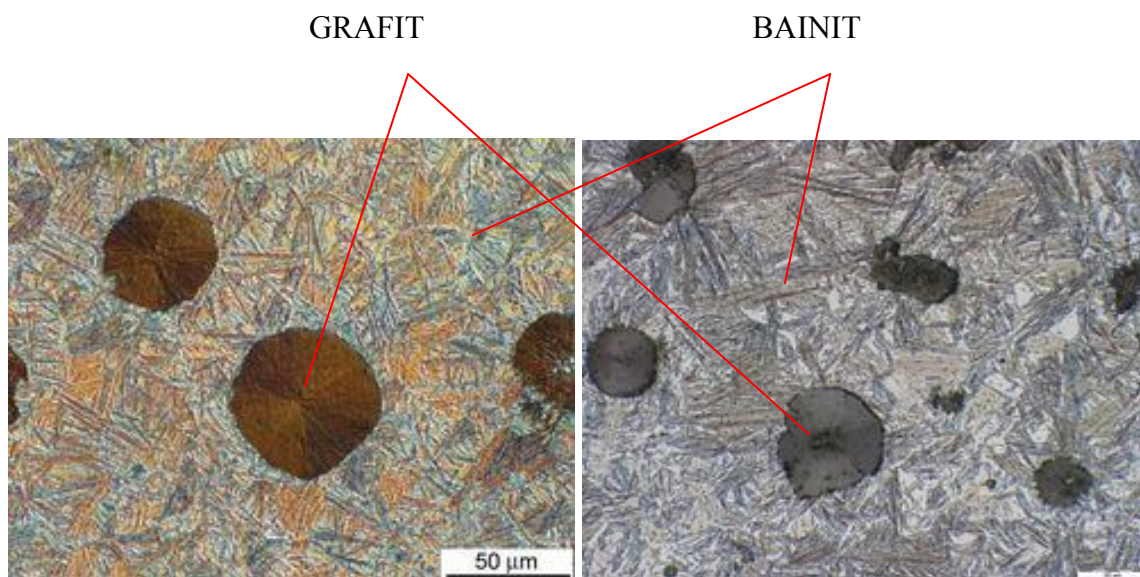


Obr. 2.23. Litina s kuličkovým grafitem s matricí perliticko-feritická [3]



Obr. 2.24. LKG s matricí feriticko-perlitickou, s min. perlitu [3]

Bainit je v těchto litinách tvořen jehlicovým feritem a stabilizovaným vysokouhlíkatým austenitem. Při vhodných podmínkách může vznikat i jako lící struktura v litinách legovaných zejména molybdenem a niklem. Běžně se této struktury dosáhne po tepelném zpracování. Tyto litiny mají vysokou pevnost a tvrdost za poměrně dobrých plastických vlastností. Vzhled bainitické struktury na metalografických výbrusech je vidět na obr. 2.25.



Obr.2.25. LKG s matricí bainitickou [3]



Sorbit je to přeměna nízkouhlíkového martenzitu popouštěním na ferit s kulovitými zrny perlitu, tato struktura má vysokou pevnost a dobrou houževnatost.

2.6. Tepelné zpracování litiny s kuličkovým grafitem [3, 7, 12]

Cílem tepelného zpracování ve většině případů bývá snížení vnitřních pnutí, vzniklých při chladnutí odlitku, popřípadě zlepšení obrobitelnosti, jelikož odlitek nechladne ve všech místech stejně. Nastává situace, že v některých místech má odlitek odlišnou strukturu, požadujeme-li pouze ferit nebo perlit, následuje žíhání feritizační, nebo normalizační žíhání, dle požadovaných vlastností. Tepelné zpracování dále využíváme ke zvýšení mechanických vlastností jako je tvrdost a pevnost, tím zvětšuje rozsah využitelnosti těchto litin. Jelikož je grafit vyloučen ve tvaru kuliček, litina si ponechává dobrou houževnatost a dobré třecí vlastnosti. Při ohřevu odlitku si musíme dávat pozor na rychlost ohřevu, týká se to hlavně odlitků s rozdílnými tloušťkami stěn a u masivních odlitků, mohlo by v nich totiž vznikat pnutí vlivem rozdílných teplot.

Žíhání ke snížení vnitřních pnutí se používá hlavně v případech kdy už nenásleduje další tepelné zpracování LKG. Vnitřní pnutí jsou deformace, které vznikly vlivem nerovnoměrného chladnutí odlitku. Ke snížení pnutí se proto používá zahřátí na teplotu 550°C až 650°C. Při této teplotě dochází k poklesu meze kluzu a dojde ke snížení, nebo odstranění pnutí. Obvyklý průběh tohoto popouštění je ohřev na 650°C po dobu jedné až dvou hodin a poté následuje ochlazování v peci rychlostí 50°C/h do teploty 200°C. Poté se odlitek nechá dochlazenout na vzduchu.

Feritizační žíhání využíváme k získání měkké a tvárné struktury, to znamená, že ho provádíme tehdy, pokud vyžadujeme feritickou strukturu v celém průřezu, jestliže této struktury nedosáhneme při odlévání. Problémy s dosažením feritické struktury, jsou hlavně u tenkých stěn odlitku, kde je vysoká rychlost chladnutí. Feritizační žíhání použijeme v případech, kdy je ferit ve většině míst odlitku. Feritické struktury se dá dosáhnout při odlévání i u tenkých stěn odlitků a to přidáním určitého množství křemíku, takto získaný ferit má ale menší tvárnost a je tvrdší. Feritizační žíhání začíná ohřevem buď na teplotu pod $A_{1,1}$ respektive $A_{1,2}$ tomu odpovídají teploty 850 až 920 °C. To který způsob si vybereme záleží na tvaru a velikosti odlitku. Po ohřevu následuje výdrž na teplotě v řádu hodinách, poté následuje přichlazení v peci a následuje ochlazování na volném



vzduch o rychlosti 100 až 150 °C/h. tímto zpracováním získáme ferit, který je vysoce houževnatý a měkčí než ferit vzniklý přidáním Si. Principem tohoto tepelného zpracování je založen na tom, že cementit obsažený v perlitu, který vznikl eutektoidní přeměnou se rozloží na ferit a grafit. Grafit difunduje již k vzniklým grafitickým útvarům, a to má za následek trvalé zvětšení odlitku oproti původnímu.

Žihání pro snížení tvrdosti se používá u odlitků se zvýšenou tvrdostí, která může být způsobená určitým množstvím ledeburitického cementitu eventuelně martenzitu, ve struktuře odlitku. Pro odstranění této tvrdosti volíme žihání při teplotě nad teplotu $A_{1,2}$ přibližně za teplot 800 °C až 950 °C, tyto teploty se volí s ohledem na to, že při vyšších teplotách je nebezpečí oxidace na hranicích zrn. Výdrž na teplotě je po dobu 1 až 4 hodin. Při tomto ohřevu se cementit rozpadne na austenit a grafit, a pak pomalu ochlazujeme. Zvýšená tvrdost může být také způsobená velmi jemným lamelárním perlitem. Tuto tvrdost odstraníme ohřevem na teplotu 600°C až 700°C po dobu dvou až osmi hodin, kdy dojde ke sferoidizaci lamel cementitu a vznikne tak struktura se zrnitým perlitem. Tato struktura má menší tvrdost a lepší houževnatost a tvárnost než lamelární perlit.

Normalizační žihání používáme pro zvýšení pevnosti a tvrdosti u odlitků, to znamená získání čistě perlitické struktury, týká se to odlitků, které mají feriticko perlitickou strukturu. Teplotu žihání volíme 50°C až 80°C nad teplotu $A_{1,2}$, doba austenitizace je závislá na množství feritu ve struktuře, obvykle se uvádí 1 až 2 hodiny na 25 mm tloušťky stěny odlitku, a pak následuje ochlazení na vzduchu. Pro odlitky s tenkými stěnami se doporučuje chladnutí v penci. Pro složitější odlitky se normalizační žihání kombinuje s žiháním na snížení vnitřních pnutí.

Kalení se používá za účelem získání vysoké tvrdosti a odolnosti vůči otěru. Po kalení následuje popouštění. U LKG pouze nízkoteplotní, aby nedošlo k rozpadu karbidů. A z toho důvodu volíme izotermické zušlechťování.

Martenzitické klení se provádí ohřevem na teplotu 50°C až 80°C nad $A_{1,2}$, vysoké teploty ohřevu by vedly k velkému množství zbytkového austenitu ve struktuře. Výdrž na požadované teplotě je závislá na obsahu feritu ve struktuře a velikosti odlitku, s rostoucím množstvím feritu se doba výdrže prodlužuje. Ideální výchozí struktura je jemně perlitická struktura. Prokalitelnost LKG je malá a to hlavně kvůli vyššímu obsahu křemíku, kalíme většinou do oleje. Před zakalením je dobré kalící teplotu snížit a nekalit přímo z austenitizační teploty, mohlo by totiž dojít ke vzniku trhlin. Grafit v matici má za následek že tvrdost bývá asi 700 HV. Po zakalení následuje popouštění.

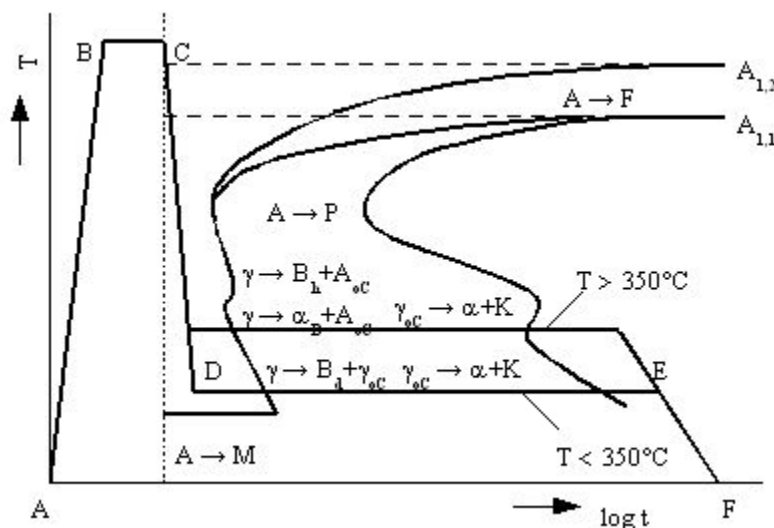


Termální kalení se využívá z toho důvodu, že přeměna austenitu na martenzit sebou přináší objemové změny, tím vznikají velká pnutí. Proto odlitek po austenitizaci ponoříme do solné lázně o teplotě 220 až 270 °C, tak aby byla teplota nad M_s , na této teplotě setrváme okolo deseti minut, až dojde k vyrovnání teploty v celém odlitku. Poté odlitek vyjmeme z lázně a necháme dochladnout na vzduchu, výsledkem je opět martenzit.

Povrchové kalení slouží pouze ke zvýšení povrchové tvrdosti, což je pro nás v moha případech výhodné a nemusíme vnášet zbytečně velká vnitřní pnutí do odlitku. Tloušťka zakalené vrstvy bývá v jednotkách milimetrů, záleží na průřezu součásti a jejím obsahu křemíku. Tento způsob kalení je vhodný pro ozubená kola, která mají i dobré kluzné vlastnosti, díky tomu, že je grafit obklopen tvrdou vrstvou.

Izotermické zušlechťování se provádí pro získání bainitické litiny. Zušlechťování se provádí obvykle izotermickým kalením do solné lázně, režimy ochlazování jsou znázorněny v obr. 2.26. Vlastnosti bainické litiny záleží na teplotě transformační prodlevy. Čím je větší austenitizační teplota tím je vyšší obsah uhlíku v austenitu a tím vyšší tvrdost a nižší tažnost má výsledná struktura. Obvykle se teplota austenitizace pohybuje v rozmezí 830 až 950 °C, u běžných odlitků je doba výdrže na této teplotě 1 až 3 hodiny. Transformační teploty se volí podle toho, jakých chceme dosáhnout požadovaných vlastností, při tomto tepelném zpracování můžeme dosáhnout meze pevnosti v tahu až 1400 MPa. Vyšší transformační teploty vedou k menší pevnosti a větší tvárnosti a naopak. Doba prodlevy na transformační teplotě volíme v optimálních mezích záleží na velikosti a chemickém složení odlitku. U tlustostěnných odlitků se tato doba může přiblížit k 10 hodinám. U běžných odlitků se doba pohybuje od půl do 4 hodin. Při krátké prodlevě se austenit nedostatečně stabilizuje a při ochlazení by se změnil na martenzit, naopak po příliš dlouhé prodlevě by došlo k vylučování karbidů a snížila by se tažnost. Abychom při ochlazování minuli perlitický nos je nutno ochlazovat vhodnou rychlostí. Do solné lázně se můžou chladit odlitky z nelegované litiny o tloušťce stěny do 30 mm, potom musíme LKG legovat molybdenem, nebo kombinací molybden nikl, popřípadě mědí. Struktura by měla být po zušlechťování čistě bainitická bez perlitu, karbidů a martenzitu, jinak nedosáhneme požadovaných vlastností. Bainitickou strukturu lze získat přímo litím, přidáme-li legury nikl a molybden. Množství obou prvků, ale musíme přizpůsobit rychlosti chladnutí, to je hlavně tloušťce stěny a materiálu formy. Při příliš nízkém obsahu legur by nám mohl vzniknout perlit a naopak při vysokém obsahu by vznikl martenzit. U takto získaných

struktur, je ale problém, že obsahují určitá množství perlitu a nebo martenzitu, jelikož nezaručíme ve všech místech formy stejnou rychlost chlazení .



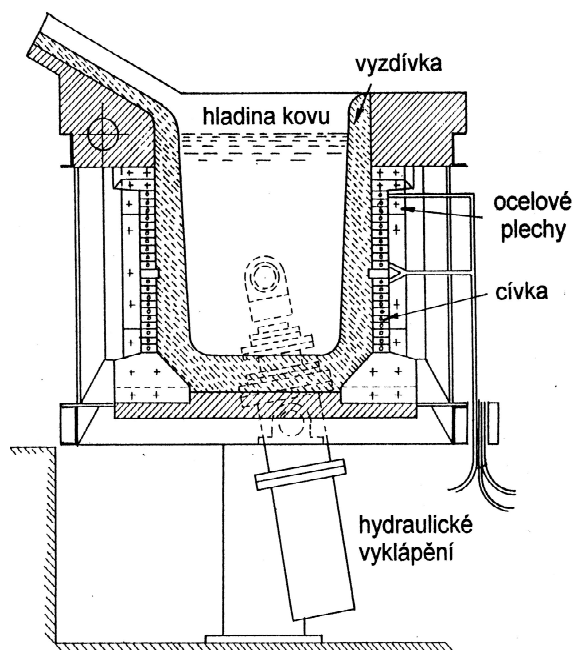
Obr. 2.26. Schéma průběhu izotermického zušlechťování ADI litiny v diagramu IRA [3]

2.7. Metalurgie litiny s kuličkovým grafitem [1, 10, 12]

2.7.1 Tavicí zařízení

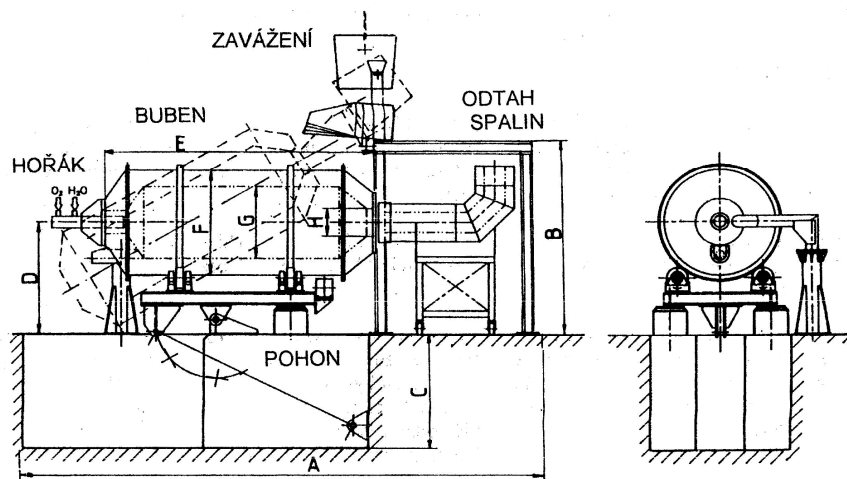
Jsou to zařízení, pomocí kterých připravujeme taveninu pro zhotovení odlitku. Je důležité, aby při tavení nedocházelo k zhoršování kvality vsázkového materiálu. Výhodné je když můžeme pomocí metalurgických procesů řídit kvalitu taveniny. Pro přípravu taveniny LKG vyžadujeme taková zařízení, která zabezpečí velmi nízké obsahy P a S, z tohoto důvodu nejsou vhodné kuplovny. Horkovzdušné kuplovny se dají použít pouze v případě kdy následuje odsíření, nebo kde můžeme modifikovat čistým Mg. Dnes jsou nejrozšířenějším typem elektrické indukční středofrekvenční pec. Nevýhodou Indukčních pecí je, že pořizovací cena je ve srovnání s kuplovnami a plynovými pecemi vysoká. Tavenina připravená v indukčních pecích má rovněž horší grafitizační stav, než tavenina připravená v kuplovně. Je to způsobeno tím, že kov ihned po natavení nevytéká z pece, ale setrvává v ní a ohřívá se. Tato nevýhoda se kompenzuje očkovadlem. V některých slévárnách se můžeme setkat s elektrickými obloukovými pecemi a to díky tomu, že se v této slévárně vyráběla ocel na odlitky. Pro tavbu litiny se dá rovněž použít i rotační bubnová pec, která je finančně méně náročná než elektrické, ale při tavení v této peci musíme počítat s oduhličením a propalem křemíku.

Elektrická indukční pec patří k nejčastěji používaným zařízením pro tavení LKG. Hlavní výhodou těchto pecí spočívá v tom, že nedochází k připalování prvků a propal je minimální, tím se dá velmi přesně řídit chemické složení výsledné tavby. Tato pec je též vhodná pro přetavování materiálu známého chemického složení. Proto musí být kontrolováno složení vsázky, aby se tavba neznečistila například fosforem a sírou, popřípadě nežádoucími prvky jako je titan, vismut a olovo. Výhodou indukčních pecí je snadná regulace tavicího procesu a dosahuje se vysokých teplot 1480 až 1540 °C. Po natavení se snadno udržuje teplota. Z ekologického hlediska je menší podíl prachových částic a plyných exhalací, oproti ostatním tavicím zařízením. K ohřevu materiálu dochází pomocí vířivých proudů vzniklých ve vsázce. Vířivé proudy nejen zahřívají vsázku, ale napomáhají k pohybu taveniny a tím dochází k dobré homogenizaci. Frekvence pece ovlivňuje kusovitost vsázky s rostoucí frekvencí je kusovitost menší. Pece se dělí na vysokofrekvenční (nad 500 Hz), středofrekvenční (150 - 500 Hz) a na síťovou frekvenci (50 Hz), nejvíce se používají středofrekvenční. A to z toho důvodu, že se pro zahájení tavby nemusí vkládat startovací blok (velký blok LKG), nebo se nechávat v peci určité množství taveniny. A postačí vsázka o určité kusovitosti pro danou pec. Nevýhodou zbylé taveniny je, že se nesmí vkládat vlhká, popřípadě silně zoxidovaná a mastná vsázka. Stejně výhody jako středofrekvenční mají i vysokofrekvenční, ale musí mít výkonnější elektroniku. Kelímkové pece jsou pro tavení, kanálové pro udržování teploty taveniny. Nevýhodou indukční pece je velká náročnost na energii.



Obr. 2.26. Indukční pec [12]

Rotační bubnové pece je jedním z modernějších tavicích agregátů a hodí se pro tavení všech druhů litin. Předností tohoto typu pece jsou nízké investiční náklady, vysoká operativnost a nízké provozní náklady. Díky spalování plynu s kyslíkem, kdy teplota plamene dosahuje až 2700 °C vzniká malé množství prachových částic, které je možno účinně odprášit. Bubnové pece jsou vhodné pro malé a střední slévárny. Bubnová pec je tvořena válcovou částí, na každém konci s kuželovým čelem. V ose předního čela je otvor pro hořáky, otvorem v zadní části se zavazuje vsázka a odvádí spaliny. Ve válcové části pláště je odpichový otvor, který je během tavení uzavřen žáruvzdornou hmotou, stejně jako je pec uvnitř opatřena žáruvzdornou vyzdívkou. Velikost pece je určena maximální hmotností vsázky, bývá v rozmezí 2-10 t. Pec je uložena na podpěrných válcích a otáčí se pomocí elektromotoru, rychlostí přibližně jedna otáčka za minutu. Pec se otáčí pouze když se vylévá tavenina a když je vsázka již natavena, pro rychlejší ohřátí taveniny. Při plnění se pec zvedne pomocí hydraulických zvedáků a současně se vysunou hořáky a otvor se zakryje. Ohřev vsázky probíhá ze začátku pouze sáláním plamene, později sáláním plamene a stykem taveniny s pláštěm ohřátého od hořáků. Při kontrole tavení popřípadě při metalurgické úpravě se vypnou a vysunou hořáky a přes tento otvor se dané úkony provádějí. Při tavení kovu v peci se při natavování volí lekcce oxidační plamen a pro přehřátí taveniny na požadovanou teplotu se volí redukční plamen. Díky těmto pochodům dochází k určitému propalu materiálu neběžněji jsou hodnoty v těchto intervalech 10 až 15 % C, 15 až 25 % Si, 25 až 32 % Mn. Proto se do vsázky ještě přidává vápenec (0,5 až 1%), který váže oxidy ze vsázky a vyzdívkou pece a vytváří povlak strusky, chránící taveninu. V peci se dosahuje teploty přes 1500 °C. pro delší životnost vyzdívkou se nepřekračuje 1480 °C.



Obr. 2.27. Bubnová pec [12]



2.7.2. Vsázkový materiál

Pro výrobu LKG s vyšším obsahem Si je zapotřebí používat kvalitní suroviny s minimálním obsahem nečistot hlavně S a P a dále musíme hlídat obsah prvků podporující tuhnutí podle metastabilní soustavy a to hlavně Cr, W, Mo, Mn, Cu. Vsázka se může skládat ze surového železa, ocelového odpadu, vratného materiálu a litinového odpadu. Litinový odpad se používá jen velmi zřídka. Nesmíme zapomenout na správnou kusovitost vsázky, která je závislá na velikosti a druhu tavicího zařízení.

Surová železa se používají taková, která mají vysokou čistotu a nízký obsah Mn, pro výrobu LKG s čistě feritickou strukturou se používají surová železa o složení Fe, C, Si. Jako nejlepší se podle dosavadních výsledků jeví SORELMETAL. Výzkumy ukázaly, že přidáním SORELMETALU do vsázky se zvyšuje počet nodulí v hotovém odlitku.

Vratný materiál, jeho množství je omezené v případě že používáme, jako modifikátor předslitinu obsahující velké množství křemíku. Musíme vypočítat kolik křemíku do taveniny vneseme modifikací a očkovaním a upravit tak vsázku, abychom dosáhli požadovaného chemického složení. Musíme také třídit jednotlivé druhy litin, aby se vrat z výroby perlitických litin nedostal do výroby feritických litin.

Ocelový odpad je nutné důkladně zkontrolovat na obsah karbidotvorných prvků, velmi kvalitní vsázkový materiál tvoří hlubokotažné plechy, které by však neměly být pozinkované. Zinek má nepříznivé vlastnosti na vznik kuličkového grafitu. Stejně tak nejsou vhodné při výrobě feritické LKG pocínované plechy, protože cín stabilizuje perlit a podporuje vznik mezibuňkového grafitu.

Litinový odpad se pro své nejisté složení raději nepoužívá. Litinové třísky použijeme pouze v malém množství a to slisované vysušené a pocházející ze stejného materiálu, jako výsledná litina.

Nauhličovadla jsou důležitou součástí vsázky, protože pro výrobu LKG se používá ocelový odpad, který obsahuje malé množství uhlíku. Pro dosažení potřebného množství slouží nauhlčovadla, od kterých se vyžaduje aby měli minimální obsah síry. U indukčních pecí je dále důležité, aby obsahovala málo popela, by vytvářel strusku.

2.8. Příprava taveniny [1, 3, 4, 12, 14]

2.8.1 Modifikace taveniny

Dnes je nejrozšířenějším modifikátorem Mg pro modifikaci se může použít čistý, ale většinou se používá ve formě předslitin. Čistý hořčík totiž bouřlivě reaguje a hořčíkové



páry dosahují tlaku okolo 1 MPa, je to vlivem vysoké teploty taveniny (okolo 1400°C). Pro správnou modifikaci a tím vznik kuličkového grafitu je třeba přidat přesné množství modifikátoru. Pro stanovení množství slouží vztah (2.4.). Využití hořčíku je dáno reakcí hořčíku s kyslíkem z atmosféry a ze strusky. Pro to aby vznikly kuličky grafitu není důležitý pouze Mg, ale obsah S a O₂. Obsah kyslíku před modifikací by měl být 100ppm a před následným očkováním 30 ppm, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku očkování. Pro zlepšení modifikačního účinku se přidává malé množství KVZ a to pro vytvoření stabilních oxidů, sulfidů a neutralizaci prvku působících proti vzniku kuličkového grafitu. Po modifikaci v odlitku vždy musí zůstat určité množství Mg, U výsledného odlitku s feritickou strukturou a tenkou stěnou by se měl pohybovat okolo 0,02% pro větší a silnostěnné odlitky, popřípadě perlitické odlitky je obsah až 0,06%

$$m_{\text{mod}} = \frac{Mg_{\text{zbyt}} + 0,76S}{\eta_{Mg} \cdot Mg_{\text{př}}} [\%] \quad (2.4)$$

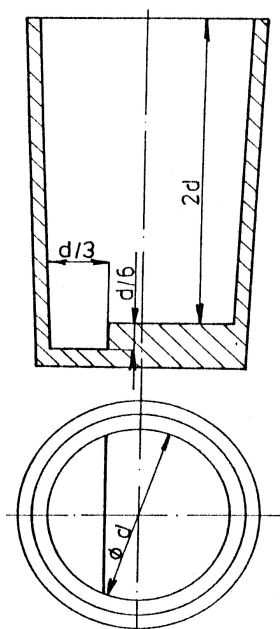
m_{mod} – množství modifikátoru (% mvs), Mg_{zbyt} – zbytkový obsah hořčíku (%), S – výchozí obsah síry v litině (%), η_{Mg} – využití hořčíku (%), $Mg_{\text{př}}$ – obsah Mg v předslitině (%)

Ztráty modifikátoru během modifikace jsou způsobovány vypařování Mg během reakce v tavenině, kdy se z taveniny uvolňují hořčíkové páry. Na vazbu se sírou $Mg + S \rightarrow MgS$ molekulová hmotnost je $24,3 + 32 = 56,3 \Rightarrow 0,76\%$ Mg se váže na 1% S. Část Hořčíku je spotřebována na vazbu kyslíku z oxidů přítomných v tavenině, které mají nižší afinitu ke kyslíku než Mg a na vazbu hořečnatých sloučenin. Součet všech těchto dějů je vlastně účinnost modifikátoru v daném zařízení.

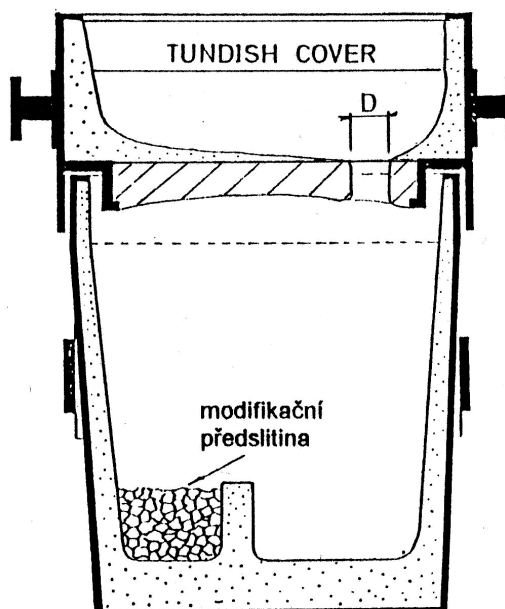
Odeznívání účinku modifikátoru je závislé na několika faktorech, které jsou při každé z metod jinak intenzivní. Děje vznikající při modifikaci jsou tyto. Na povrchu probíhá reoxidace, MgS reaguje s kyslíkem z atmosféry a síra se znovu vrací do taveniny, $2MgS + O_2 \rightarrow 2MgO + S$. Tím na sebe síra váže více Mg než je uvedeno ve stechiometrické rovnici $Mg + S \rightarrow MgS$. Samotná oxidace Mg s kyslíkem z atmosféry, nejvíce při přelévání kovu. A nakonec reakce Mg s vyzdívkou a struskou. Při používání pánve se intenzita reakce mezi vyzdívkou a Mg zpomaluje díky usazování komplexních sloučenin na vyzdívce.

2.8.1.1 způsoby modifikace

Existuje několik metod a jejich volba záleží na možnostech slévárny, jiné metody se používají v hromadné výrobě a jiné při příležitostné výrobě. Způsoby může rozdělit zhruba na dvě metody a to polévací a ponořovací. Vždy musíme mít na paměti, že účinek modifikace funguje jen po určitou dobu, do této doby musí tavenina ztuhnout ve formě, jinak nebude zaručen odlitek s kuličkovým grafitem. Rychlost odeznívání modifikačního účinku můžeme rozdělit na vlivy které dobu modifikačního účinku prodlužují, to je přidáním prvků brzdících reakce Mg, stažení strusky z pánve po 1 až 2 minutách modifikační reakce, použití neutrální vyzdívky pánve a pánve s ochranou atmosférou. Naopak vlivy které modifikační účinek snižují jsou hlavně vysoká teplota taveniny, vysoký obsah Mg použitý při modifikaci. Níže jsou popsány nejpoužívanější modifikační metody.



Obr. 2.28. (vlevo) Pánev pro metodu sandwich [12]



Obr. 2.29. (vpravo) Pánev pro metodu tundisch [12]

Metoda sandwich

Modifikace se provádí ve vysoké pánvi (obr. 2.28), která má na dně komůrku do, které se vkládá modifikátor, na něj se dá očkovadlo FeSi a překryje se vhodným materiálem. Vhodným materiálem na překrytí je plech, ústřížky plechu popřípadě litinové třísky. Krycí vrstva brání vyplouvání modifikátoru a očkovadla a oddálí reakci pro bezpečné nalití taveniny do pánve. Hmotnost krycí vrstvy se přibližně stanovuje jako 1 % hmotnosti taveniny. Tloušťka krycí vrstvy by měla být alespoň 2 mm. Pánve jsou vysoké, aby metalostatický tlak snížil bouřlivost reakce. Při modifikaci dochází k poklesu teploty o



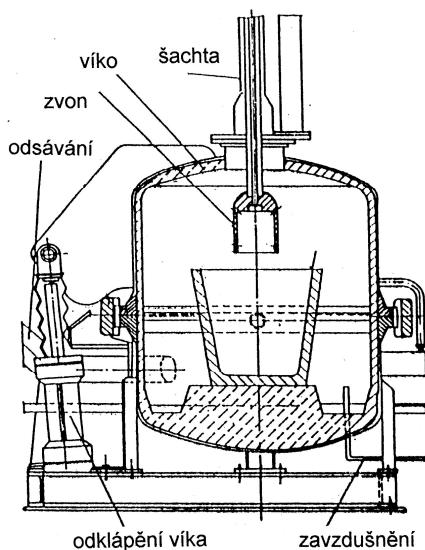
30 až 50 °C, pro malé pánve jsou vyšší ztráty. Využití hořčíku je 40 až 50 %. Po modifikaci musíme taveninu přelít do odlévací pánve.

Metoda Tundisch

Pánev (obr. 2.29) je opatřena odnímatelným víkem, které je při modifikaci pevně spojeno s pánví. Ve víku je prostor pro vytvoření hladiny taveniny která teče do pánve do prostoru kde není modifikátor. Pro modifikaci se používají předslitiny FeSiMg a využití hořčíku je 60 až 70 %, oproti metodě sandwich jsou menší ztráty rozstřikem a menší teplotní ztráty. Tato metoda patří k nerozšířenějším. Po modifikaci musíme taveninu přelít do odlévací pánve.

Modifikace ve sferoklávu

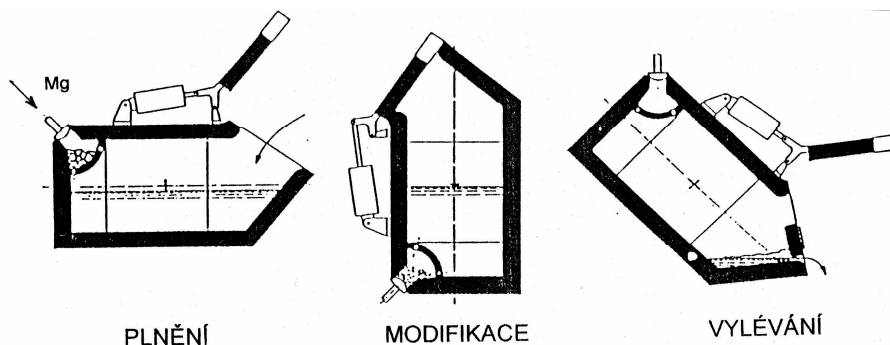
Modifikace probíhá za zvýšeného tlaku až 1 MPa. Na nádobě sferoklávu (obr. 2.30.) je odklopné víko, který prochází tyč se zvonem. Změnou tlaku ve sferoklávu řídíme bouřlivost reakce. Díky zvýšenému tlaku můžeme použít předslitiny s obsahem Mg až 25% a bez Si, tím pádem nemusíme řešit obsah křemíku v tavenině při přetavování vratného materialu. Využití Mg je 60 až 80%. Nevýhodou zařízení je vysoká pořizovací cena.



Obr. 2.30. Sferokláv [12]

Metoda v Konvektoru +GF+

Modifikace se provádí v nádobě konvertoru, který je otočný podél příčné osy. Nádoba je opatřena otevíracím víkem a speciální komůrkou pro modifikátor. Komůrka je tvořena grafitovou deskou s dírami o daném průměru a množství pro správný průběh modifikace. Pro modifikaci se používá čistý hořčík. Tavenina se po modifikaci přelije do odlévací pánve. Před každou modifikací se modifikační komůrka vyčistí a vloží se nová dávka modifikátoru. Reakce probíhá v poklidu díky samoregulaci na principu poměru tlaku hořčíkových par a metalostatického tlaku. Při modifikaci čistým hořčíkem může tavenina obsahovat vyšší obsah síry, musí se ale zvýšit dávka modifikátoru. Přibližně v poměru 1,5 kg síry na 1 kg hořčíku. Tato metoda je vhodná pro zpracování velkého množství taveniny, aby si tavenina v konvertoru udržela potřebnou teplotu.



Obr. 2.31. Postup modifikace v Konvektoru +GF+ [12]

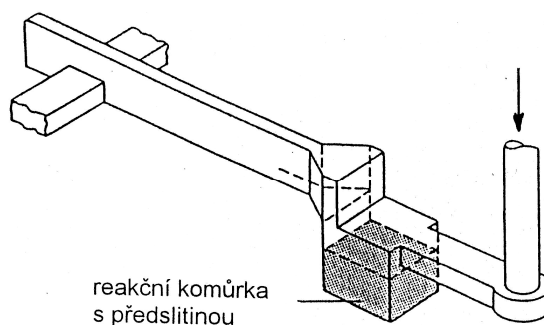
Modifikace plněným profilem

Modifikační drát obsahuje Mg, Si, Ca, KVZ, Fe v určitém poměru dle výrobce. Dávkování je určeno pomocí dálky profilu ponořeného do taveniny. Rychlost podávání je taková aby k reakci docházelo u dna pánve, ale profil nesmí narážet do dna. Nevýhodou je vysoká cena plněného profilu. Profil může být vkládán při lití, tím pádem nehrozí odeznění modifikačního účinku.

Metoda Inmold

Má výhodu v tom že nemusíme řešit dobu účinku modifikace, k modifikaci totiž dochází ve speciální komůrce která je součástí v vtokové soustavy odlitku. Využívají se předslitiny FeSiMg do 5% Mg k modifikaci dochází při lití, a proto už nemusíme očkovat. Při modifikaci vzniká struska, kterou musíme zachytit se struskováním a filtrů. Objem strusky je závislý na obsahu síry, proto se používají tavení s obsahem síry do 0,01% S.

Využití hořčíku je 60 až 80 %. Komůrka musí mít takový tvar aby k modifikaci docházelo po celou dobu lití. Velikost a tvar komůrky je pro každý odlitek individuální a musí se vždy odzkoušet. Nevýhodou je snížení využitelnosti roztaveného materiálu a nutnost větších formovacích rámců a složitější formování vtokové soustavy. Tato metoda má využití v hromadné výrobě s velkým podílem automatizace, kde je zaručena kontrola výroby. Musíme totiž kontrolovat každý výrobek.



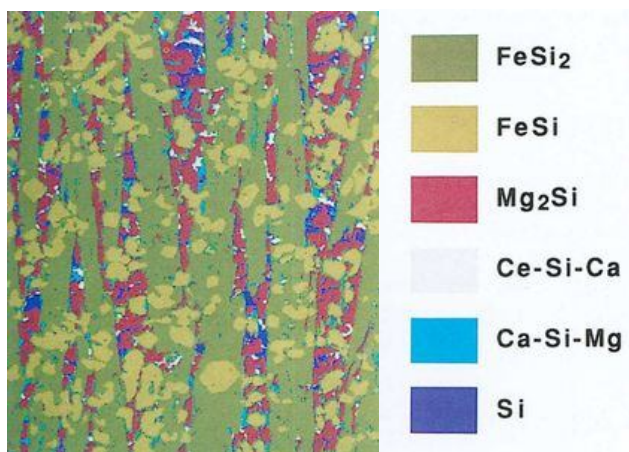
Obr. 2.32. Část lící soustavy s umístěním modifikátoru [12]

2.8.1.2. Druhy modifikátorů

V dnešní době se používají převážně modifikátory na bázi FeSiMg pro jejich dobrou cenu a vlastnosti. Kromě těchto základních prvků obsahují ještě KVZ, Ca, Al, Ni. poměry jednotlivých kovů jsou závislé na druhu modifikátoru. Předslitiny se používají, protože čistý Mg reaguje bouřlivě a dá se použít jen v některých modifikačních zařízeních. Obecně platí, že čím je v před slitině menší obsah Mg, tím je reakce méně bouřlivá. Pro modifikaci se dají použít i KVZ, vytváří stabilní oxidy a sulfidy a neprodělávají bouřlivou reakci jako Mg, ale jejich cena je vysoká.

Slitiny hořčíku s niklem (4 - 6 % Mg a zbytek nikl nebo 13 - 16 % Mg, s přísadou Si, Fe a zbytek Ni) jsou těžší jak tekutý kov a tím klesají na dno pánve. Mají dobrou účinnost, protože zůstávají na dně pánve. Jsou na druhou stranu drahé a stabilizují perlit.

Slitiny hořčíku s křemíkem a dalšími přísadami (3 - 30 % Mg, 45 - 55 % Si, do 4 % Ca, cca 1 % Al, do 5 % kovů vzácných zemin, zbytek Fe) jsou v současnosti nejvíce používanými. Schéma struktury konkrétního modifikátoru Fe-Si-Mg-Ca-Ce je na obr. 2.33.



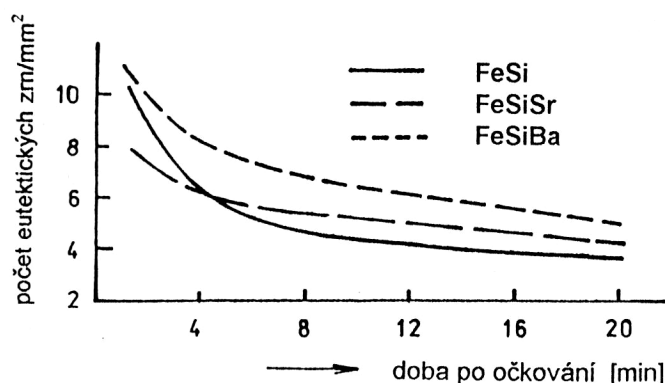
Obr. 2.33. Struktura modifikátoru Fe-Si-Mg-Ca-Ce [3]

2.8.2. Očkování

Je to děj který následuje po modifikaci nebo je součástí modifikace. Očkování provádíme z několika důvodů. Prvním je potlačení karbidotvorných účinků modifikátoru, druhý je zlepšení zárodečného stavu taveniny. Zlepšením zárodečného stavu se dosáhne jemnějšího grafitu rozmístěného v celém objemu odlitku. V neposlední řadě je očkování spojeno se smršťováním odlitků. Čím větší je hustota nodulí tím menší je výsledné smršťení odlitků tento jev potvrdil pokusy J. K. Mally. Vlivem očkování dojde i k ustálení hodnot meze pevnosti v tahu, tvrdosti a s tím související obrobitelnost.

To jak bude tavenina reagovat na očkování ovlivňuje více faktorů, průběh tavby a tavící zařízení, složení vsázky, modifikační teplota, obsah karbidotvorných prvků, množství a zrnitost použitého očkovadla a načasování očkování. U vsázkového materialu bylo zmíněno, že není dobré dodávat všechny křemík v podobě očkovadla či přímo ve vsázce.

Očkovadlo obsahuje v malém množství (desetiny až jednotky %) i jiné prvky než Si a Fe. Tyto prvky mají značný vliv na vznik nukleačních zárodku. Jedná se o prvky Ca, Al, Sr, Ba, Zr, Ce. Tyto prvky jsou velmi aktivní a reagují s kyslíkem a sírou obsaženou v tavenině a tvoří oxidické sloučeniny CaO.SiO_2 , $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$, SrO.SiO_2 nebo BaO.SiO_2 tyto sloučeniny obalují jádro tvořené sulfidy CaS, MgS, CeS. Jádra vznikají jak modifikací tak při očkování.

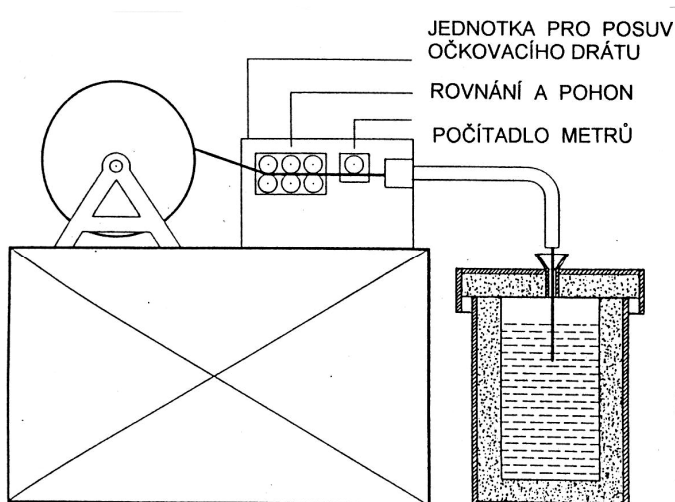


Obr. 2.34. Odezňování očkovacího účinku různých typů očkovadel [12]

2.8.2.1. Způsoby očkování

Dělí se na tři způsoby, které se dají použít jednotlivě popřípadě se dá použít jejich kombinace. První metoda je očkování v pánvi a to může probíhat současně s modifikací, nebo následně po modifikaci. Očkování v proudu taveniny a nakonec očkování v samotné slévárenské formě. Každá metoda má své výhody a nevýhody, s pohledu slábnutí účinku v čase, je nevýhodné očkovat do pánve, a pak odlévat. Mohlo by se totiž stát, že než ztuhne poslední odlitek účinek očkovadla odezní. Dalším faktorem je dokonalé promísení očkovadla a taveniny, v tom má oproti ostatním metodám očkování v pánvi výhodu. Při očkování v pánvi se nalije přibližně třetina taveniny, přidá se očkovadlo a přilije se zbytek taveniny. U metody očkování v proudu kovu (obr. 2.36.) musí být proces řízen automaticky, aby nadávkování bylo přesné a očkovadlo se dávkovalo do kovu po celou dobu odlévání ve stejném množství. Při umístění očkovadla ve formě je vhodné dát do dutiny formy filtr a na něj očkovadlo, aby se tavenina dobře naočkovala (obr. 2.37.).

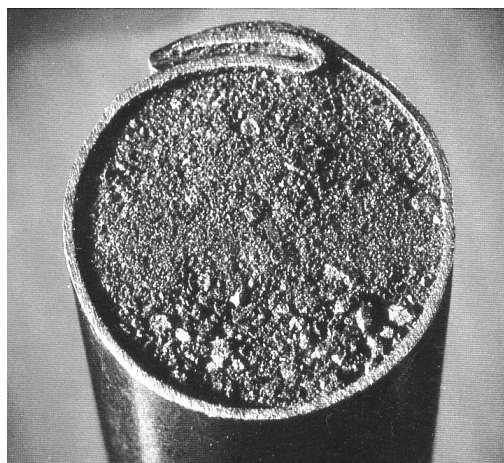
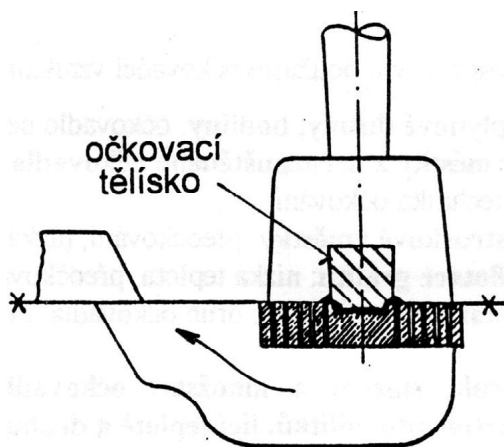
Nejběžnější formy očkování jsou očkování v proudu kovu, poté následuje očkování v pánvi buď kusovým očkovadlem nebo plněným profilem (obr. 2.35., obr. 2.38). Výhoda profilu je, že se v tavenině dobře a rovnoměrně rozpouští. A nejméně se využívá očkování v dutině formy.



Obr. 2.35. (vlevo) Očkování plněným profilem [12]

Obr. 2.36. (vpravo) Očkování v proudu taveniny [12]

U očkovadel je důležité aby měli vyhovující kusovitost a byli dobře skladováni, působením vlhka a vzduch oxidují a ztrácí účinek. Pro očkování v pánvi se volí očkovadla o větší kusovitosti. Do proudu kovu jsou vhodná velmi jemná očkovadla. V dutině formy se používají bločky o přesné hmotnosti.



Obr. 2.37. (vlevo) Očkování v dutině formy [12]

Obr. 2.38. (vpravo) Průřez plněného profilu [12]

2.8.2.2. Druhy očkovadel

Používají se očkovadla, která obsahují od 45 až 75 %Si a zbytek tvoří Fe. Postupným výzkumem se zjistilo, že přidáním určitých prvků Ca, Ba, Sr, Zr, Ce, Al, se dá prodloužit účinek očkovadla, tyto očkovadla se nazývají komplexní očkovadla na bázi



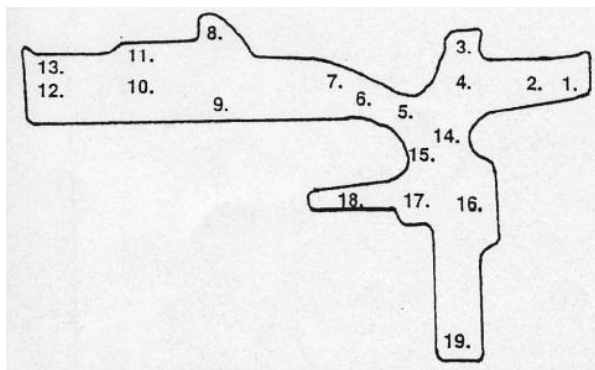
ferosilicia, takto obohacená očkovadla, mají oproti běžným očkovadlům Fe-Si delší dobu odeznívání účinku a lepší zárodečný stav. Obsahy těchto prvků jsou v očkovadle v řádu desetin až jednotek procent. V poslední době se zkoušejí očkovadla na bázi karbidu křemíku (SiC), SiC má teplotu tání okolo 1700°C , tím pádem se v litině nerozpouští, ale postupně rozbíjí, a tak vytváří vhodné zárodky. Tyto očkovadla mají vysokou účinnost v taveninách pocházejících z ocelové vsázky, kde kompenzují nevýhodný zárodečný stav taveniny. Výzkum těchto očkovadel je zatím na počátku a není ještě plně prokázána jeho spolehlivost a opakovatelnost výsledků.

Tab. 2.3. Nejběžnější očkovadla a jejich chemické složení [12]

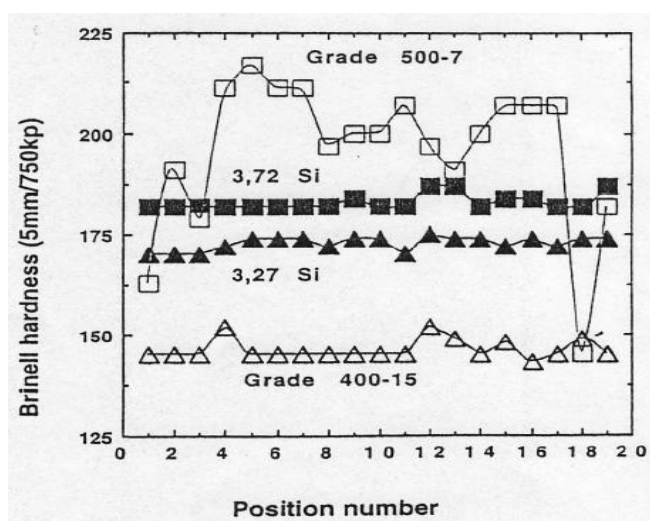
očkovadlo	Koncentrace jednotlivých prvků [%]						
	Si	Ca	Ba	Sr	Zr	Ce	Al
SUPERSEED® 75 Inoculant	73 - 78	max 0,1		0,6 - 1,0			max 0,5
SUPERSEED® 50 Inoculant	46 - 50	max 0,1		0,6 - 1,0			max 0,5
SUPERSEED® EXTRA Inoculant	73 - 78	max 0,1		0,6 - 1,0	1,0 - 1,5		max 0,5
ULTRASEED® Inoculant	70 - 76	0,75 - 1,25				1,5 - 2,0	0,75 - 1,25
FOUNDRI SIL® Inoculant	73 - 78	0,75 - 1,25	0,75 - 1,25				0,75 - 1,25
BARINOC® Inoculant	72 - 78	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0				max 1,5
ZIRCINOC® Inoculant	73 - 78	2,0 - 2,5			1,3 - 1,8		1,0 - 1,5
RESEED® Inoculant	70 - 76	0,75 - 1,25				1,5 - 2,0	0,75 - 1,25
ALINOC® Inoculant	70 - 75	0,5 - 1,5					3,5 - 4,5
F.G FeSi / VAXON® Inoculant	73 - 78	0,5 - 1,0					0,75 - 1,25

2.9. Výzkum ve Švédsku [8]

Důvod výzkumu byl, že stávající používané materiály EN-GJS 450-10, EN-GJS 500-7 s perliticko-feritickou strukturou, by měli být nahrazeny takovými materiály, které by měli čistě feritickou strukturu a stejné nebo lepší mechanické vlastnosti. Pro vznik jednotné struktury je nutné dodržet určité podmínky, jako je nukleáční stav taveniny, chemické složení a předepsaná rychlost chladnutí. V dnešní době řízení jakosti není s prvními dvěmi podmínkami problém, ale odlitky složitých tvarů a s rozdílnou tloušťkou stěn chladnou v různých místech různou rychlostí. To má za následek vznik feriticko-perlitické struktury. Tyto odlitky pak vykazují velké rozdíly tvrdosti (tab. 2.4). Největší rozdíly byly u výroby náboje kola pro nákladní automobily (obr. 2.40, obr. 2.41.).



Obr. 2.39. Průřez náboje kola. Označené body ukazují umístění vtisků pro zjištění tvrdosti [8]



Brinell hardness (5mm/750 kp) – tvrdost dle Brinella

Position nubers – číslo pozice

Obr. 3.40. Rozdíly v tvrdosti na náboji předního kola podle pozice označené v obr. 3.4.
Materiál EN-GJS 500-7, EN-GJS 400-15 a experimentální slitiny s různým
obsahem Si, které mají feritickou strukturu [8]

Tabulka 2.4. Výsledky statistického vyhodnocení měření tvrdosti na nábojích kol [8]

Hodnoty	2,4 %Si	3,3 %Si	3,72 %Si	EN-GJS 500-7
Průměrná hodnota	146,2	172,8	183,1	195,9
Střední hodnota	145	174	182	200
standardní odchylka	±5	±3,4	±3,8	±32,6
min. hodnota	143	170	182	145
max. hodnota	152	175	187	217
MAX-MIN	9	5	5	72



Proto se snažili najít takový materiál, který by nevykazoval vysoké rozdíly v tvrdosti, měl jednotnou strukturu a bude méně náročný na nukleární stav taveniny. Požadovaného výsledku se dosáhlo zvýšením obsahem křemíku. Zkoumali se materiály jež měli uhlíkový ekvivalent $Ce = 4,3$ a obsah křemíku se měnil v rozmezí 2,3 %Si až 4,1% Si. (tab. 2.5).

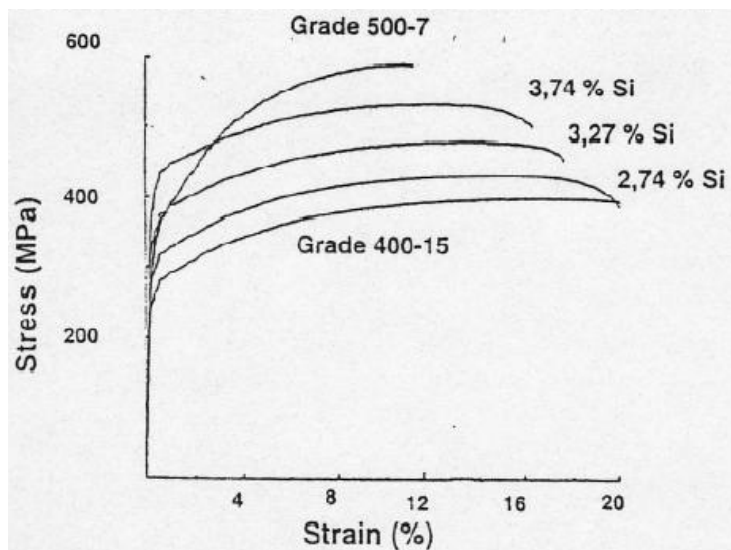
Tabulka 2.6. Chemické složení jednotlivých LKG [8]

Vzorek, číslo	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	Cu [%]	Mg [%]	Ce
stupňovité vzorky a náboje kol							
1	3,44	3,7	0,25	0,01	0,04	0,037	4,38
2	3,29	3,72	0,23	0,01	0,04	0,043	4,23
3 (EN-GJS 500-7)	3,62	2,33	0,35	0,01	0,26	0,045	4,21
4 (EN-GJS 400-15)	3,55	2,4	0,23	0,01	0,05	0,039	4,16
desky							
EN-GJS 400-15	3,71	2,35	0,22	0,012	0,02	0,04	4,3
I – GJS s 2,74% Si	3,54	2,74	0,24	0,012	0,027	0,04	4,23
II - GJS s 3,27% Si	3,4	3,27	0,23	0,012	0,026	0,049	4,22
III - GJS s 3,74% Si	3,26	3,74	0,23	0,012	0,026	0,059	4,2
EN-GJS 500-7	3,6	2,45	0,37	0,012	0,29	0,048	4,21
zkušební tyče dle ISO 1083 2004(E)							
1	3,68	2,25	*/	<0,02	<0,05	**/	4,24
2	3,45	2,76	*/	<0,02	<0,05	**/	4,14
3	3,35	3,01	*/	<0,02	<0,05	**/	4,1
4	3,4	3,61	*/	<0,02	<0,05	**/	4,3
5	3,32	4,16	*/	<0,02	<0,05	**/	4,36

*/ 0,19 – 0,24% Mn

**/ 0,036 – 0,056% Mg

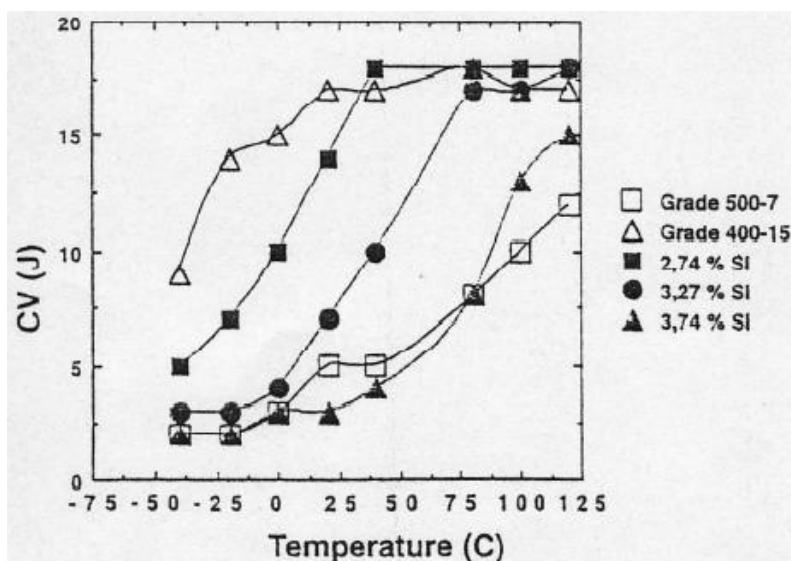
Měření ukázala, že se došlo k výraznému poklesu rozptylu tvrdostí. Mechanické vlastnosti, byli v některých ohledech dokonce lepší než u stávajících materiálů (obr. 2.41). Rázová houževnatost (obr. 2.42) byla srovnatelné pro materiály o podobných mechanických vlastnostech. Tranzitní teplota byla stejné, nebo mírně nižší.



Stress – napětí

Strain – poměrné prodloužení

Obr. 2.41. Křivky napětí pro různé slitiny, vzorky brané z litých desek ($t = 40\text{mm}$). [8]



Temperature – teplota

CV - vrubová houževnatost

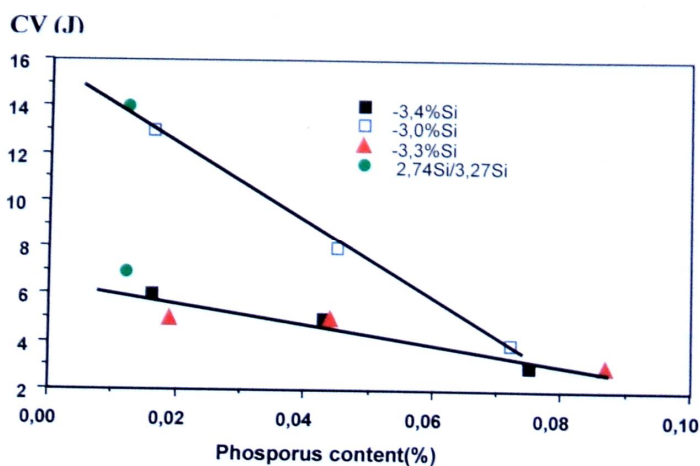
Obr. 2.42. Odchyly ve vrubové houževnatosti s teplotou pro všechny materiály
(Testované vzorky jsou zhotoveny z materiálu braného z litých plátů) [8]

U nových materiálů se provedla analýza, ze které vyplývá, že by mohli klesnout náklady na obrábění. Díky vyrovnaným mechanickým vlastnostem v různých tloušťkách stěn by mohlo dojít k optimalizaci některých dílů a zmenšení množství materiálu na jejich výrobu.



Z výsledků vyplívá, že LKG s obsahem křemíku okolo 3,5 % Si by mohla být adekvátní náhradou za EN-GJS 500-7 a LKG s obsahem okolo 2,9% Si může poskytovat alternativu pro EN-GJS 450-10. (obr. 2.45).

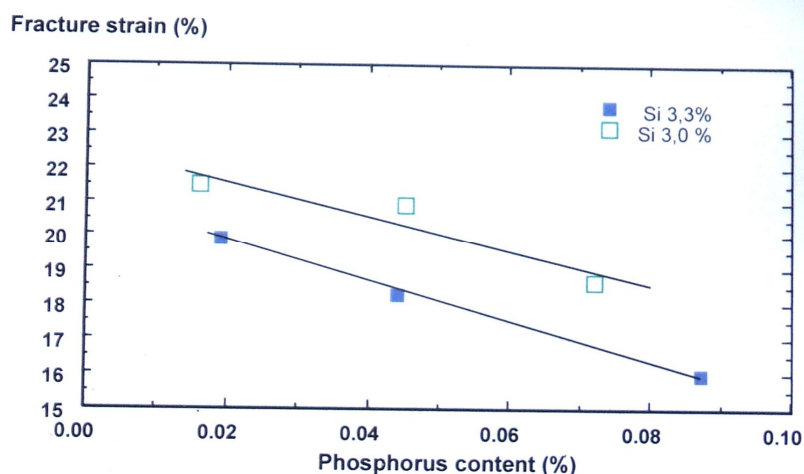
Dále z výsledků vyplynulo, že pro mechanické vlastnosti je důležité nízký obsah fosforu. Proto aby bylo dosaženo tažnosti okolo 20% při uhlíkovém ekvivalentu okolo 4,3% a 3 až 3,4 %Si je nutné, aby obsah fosforu byl v rozmezí 0,02 až 0,08 %P (obr. 2.44.). Z hlediska vrubové houževnatosti je stávající povolený obsah 0,05% P vysoký (obr. 2.45.). Proto pro výrobu kvalitní LKG s vyšším obsahem Si je nutné držet obsah fosforu okolo 0,03%P.



Phosphorus content (%) – obsah fosforu (%)

CV – nárazová práce

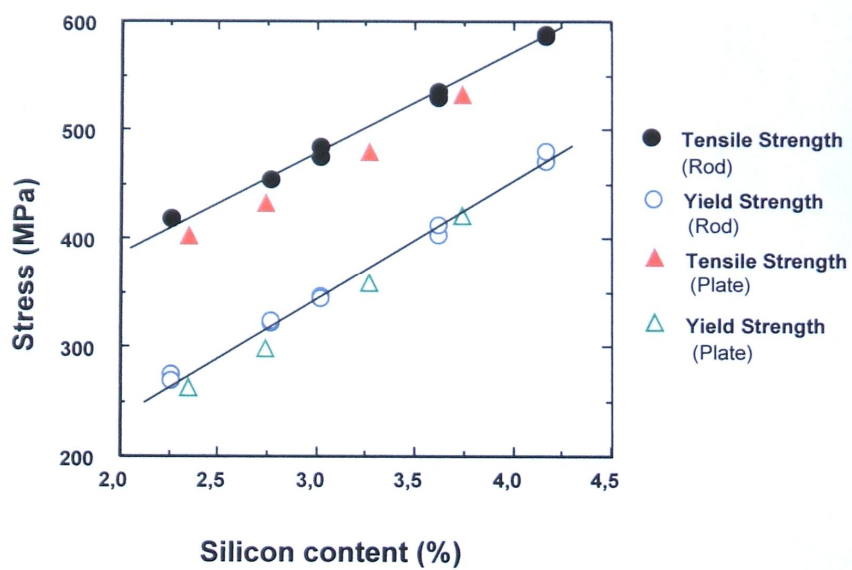
Obr 2.43. Nárazová práce v závislosti na obsahu fosforu [9]



Phosphorus content (%) – obsah fosforu (%)

Fracture strain – poměrné prodloužení do přetržení

Obr. 2.44. Tažnost materiálu v závislosti na koncentraci fosforu [9]



Stress (MPa) – napětí (MPa)

Silicon content – obsah křemíku

Rod – tyče

Plate – desky

Obr 2.45. Vliv obsahu křemíku na mez kluzu a mez pevnosti. [9]



3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimenty této práce byly zaměřeny na sledování struktury a vlastností litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku s ohledem na technologické parametry procesu. Pro tento účel byla vyvinuta metodika přípravy taveniny pro výrobu LKG s vyšším obsahem křemíku, včetně složení, množství vsázkových surovin, očkovačla, modifikátoru, postupu modifikace a očkování. Všechny tavby byly provedeny poloprovoze Katedry strojírenské technologie, FS - TU v Liberci, tím byly zaručeny konstantní podmínky (chemické složení taveniny s nízkým obsahem nežádoucích prvků – S a P, teplota taveniny při modifikaci a očkování), které jsou nutné pro náročnou metalurgickou přípravu LKG.

3.1 Příprava taveniny

Tavby byly prováděny v kelímkové středofrekvenční indukční peci IO 40 (obr. 3.1.) pro maximální množství 40 kg taveniny (výrobcem je firma Indukce, s.r.o.). Pec byla opatřena kyselou vyzdívkou (Calderys SILICA MIX 7A). Pro odlévání byla použita hluboká modifikační pánve pro polévací metodu s přepážkou ve spodní části (obr. 3.1.). Vyzdívka pánve byla kyselá (obchodní název ACYKUP). Vsázkový materiál byl připraven pro všechny tavby zvlášť. Pro přípravu vsázky (tab. 3.3.) bylo použito surové železo s obchodním názvem SORELMETAL, jehož chemické složení je uvedeno v tabulce 3.1., dále vratný odpad z předchozích provedených taveb a vratný odpad z Komerční slévárny šedé a tvárné litiny Turnov.

Tabulka 3.1. Chemické složení surového železa SORELMETAL

Obsah prvků [%]						
Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni
95,48	4,23	0,15	0,013	0,026	0,01	0,007

Vsázkový materiál byl připraven s odstupňovaným množstvím křemíku. K výrobě litiny byla použita dvě očkovačla FeSi75 a Superseed, jejich chemické složení je v tab. 3.2.

Tabulka 3.2. Chemické složení očkovačel

Typ očkovačla	Obsah prvků [%]				
	Fe	Si	Al	Ca	Sr
FeSi 75	25	75	-	-	-
Superseed	Zbytek	75	Max. 0,5	0,1	0,8



Tabulka 3.3. Složení vsázky jednotlivých taveb

Označení		Složení vsázky [kg]		
Tavby	SORELMETAL	Vrat	FeSi75	FeMn65
Číslo 1	16	-	0,39	-
Číslo 2	27	-	1,1	-
Číslo 3	14,5	14,7	0,2	0,1
Číslo 4	6,5	21,2	0,19	-
Číslo 5	7,5	19,1	0,05	-
Číslo 6	5,1	12,4	-	-



Obr. 3.1. Měření teploty optickým pyrometrem v indukční peci



Obr. 3.2. Modifikační a odlévací pánev s modifikátorem a očkovačem
Tabulka 3.4. Chemické složení modifikátoru MgFeSi

Obsah prvků [%]						
Si	Mg	Ca	Al	Ce	La	Fe
43,6	5,6	<0,05	<0,02	<0,01	<0,01	Zbytek

Pro výrobu LKG s vyšším obsahem křemíku bylo provedeno několik taveb, ve kterých bylo voleno rozdílné chemické složení. Nejdůležitějším kritériem bylo zabezpečit požadované množství křemíku pro každou tavbu. Použité množství předslutin (grafitizační očkovač FeSi75 a Superseed a modifikátory KVZ a MgFeSi) bylo stanoveno na základě výpočtu vzhledem ke konečnému obsahu křemíku. Vsázka byla zahřátá na teplotu 1450 °C, to proto aby tavenina před odléváním do forem měla teplotu 1400 °C. Teplota taveniny byla sledována pomocí optického pyrometru. Modifikační a zároveň lící pánev byla předehřátá na teplotu cca. 600 °C pro snížení rychlosti ochlazování taveniny během přelitu a modifikace. Do pánve bylo vloženo odvážené množství modifikátoru MgFeSi, viz tab. 3.5 a očkovač FeSi75 a vše bylo překryto drobnějšími ústřížky karosářského plechu, popřípadě litinovými třískami. Po rozpuštění modifikátoru, následoval druhý stupeň očkování. Na hladinu taveniny v pánvi bylo nasypáno odměřené množství očkovač Superseed, viz tab. 3.5.

Tabulka 3.5. Přehled množství použitého očkovač a modifikátorů

Označení	Předslutiny očkovač a modifikátorů [kg]			
	Očkovač	Modifikátor		
Tavby	FeSi75	Superseed	KVZ	MgFeSi

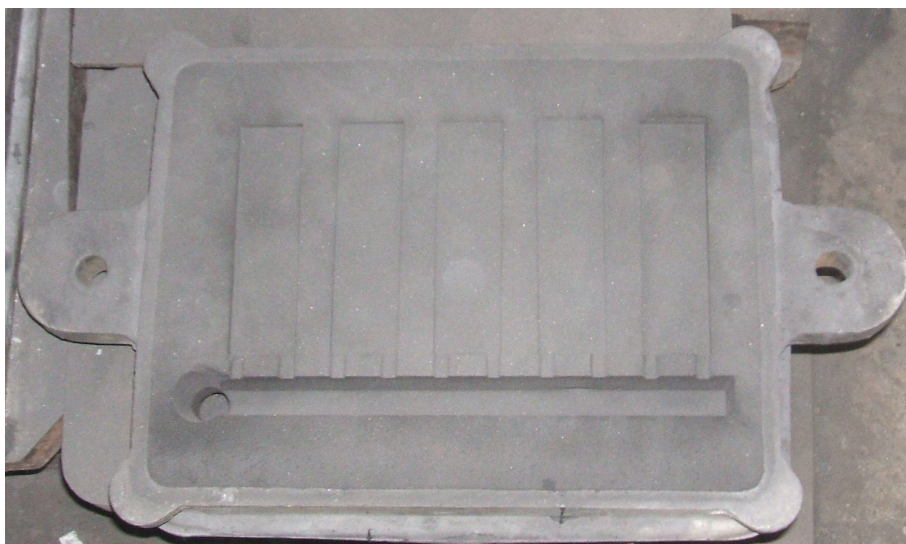


Číslo 1	0,10	0,10	0	0,23
Číslo 2	0,16	0,11	0,0043	0,43
Číslo 3	0,17	0,12	0,0044	0,46
Číslo 4	0,15	0,10	0,0045	0,46
Číslo 5	0,16	0,10	0,0046	0,46
Číslo 6	0,099	0,065	0,0029	0,30

Po promíchání taveniny byla zjištěna teplota taveniny optickým pyrometrem. Odlévání bylo provedeno při teplotě taveniny 1400 °C.

3.2 Charakteristiku slévárenské formy

Byla použita bentonitová formovací směs, ostřivem byl křemenný písek Střeleč T2S, pojivem bentonit Speciál 550 (7 hmotnostních %), 3 hmotnostní % vody a 4 hmotnostní procenta kamenouhelné močky, jejíž význam je snížení penetrace taveniny mezi zrna ostřiva.. Formovací směs v rámech byla upěchována a před složením obou rámů byl líc formy postříkán vodním roztokem melasy, z důvodu zpevnění líce formy a posypán kamenouhelnou moučkou.



Obr. 3.3. Pohled na dutinu slévárenské formy zkušebních destiček



Obr. 3.4. Slévárenská forma z CT směsi pro odlití zkušebních tyčí

3.3 Odlévání a výroba zkušebních odlitků

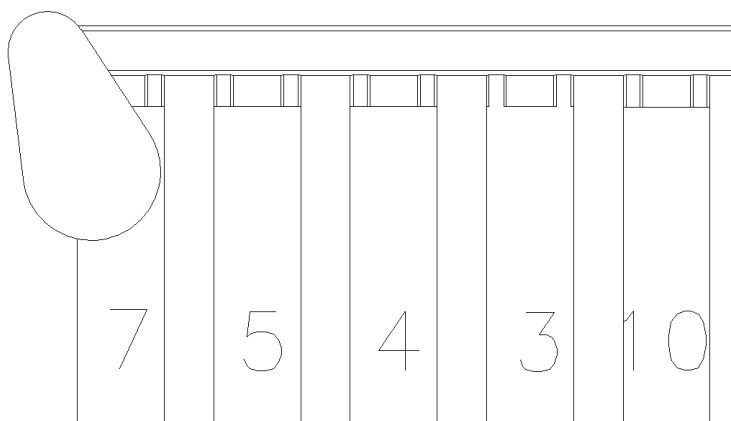
Po vylití taveny z pece do pánve a po metalurgickém ošetření taveniny a změření její teploty optickým pyrometrem (obr. 3.1), bylo provedeno odlévání. Při odlévání bylo dbáno na to, aby experimenty probíhaly pokud možno při stejných podmínkách. Podle technických možností doba lití nepřesáhla 15 sekund. Pánev naplněná taveninou má hmotnost cca 55 kg.



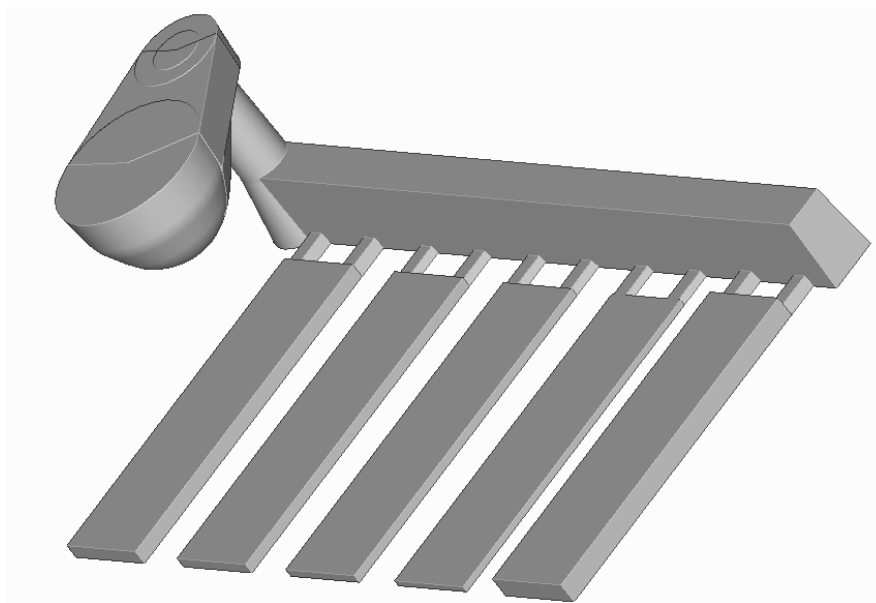
Obr. 3.5. Odlévání zkušebních vzorků, tyče vlevo, destičky vpravo



Pro prvotní stanovení struktury litiny byly odlity z LKG i zkušební odlitky $\varnothing 30$ mm a délce 115 mm. Slévárenská forma je válcového tvaru s vnějším $\varnothing 70 \times 120$ mm, zhotovena z CT směsi, profouknuta CO_2 . Vzorky byly odlévány ve svislé poloze. Na obr. 3.4 je slévárenská forma pro odlévání zkušebních odlitků. Dále byly odlévány zkušební odlitky tvaru desky, viz. obr. 3.6., obr. 3.7. Rozměry odlévaných desek byly 160×43 mm, tloušťky 3, 4, 5, 7, 10 mm.



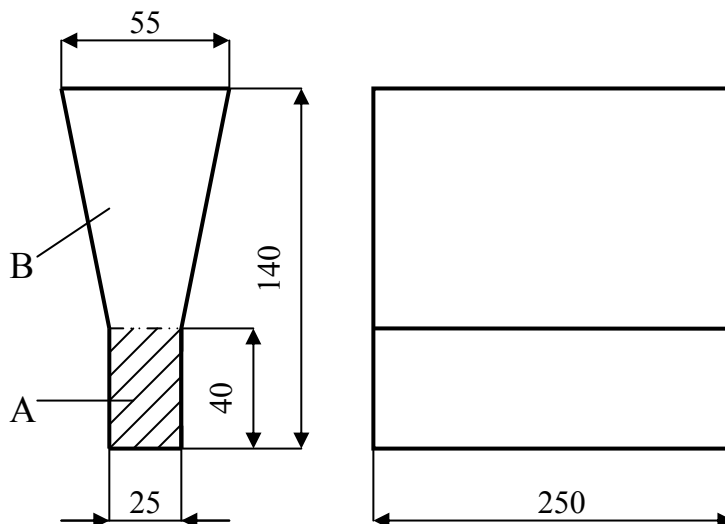
Obr. 3.6. Tloušťky jednotlivých destiček a jejich poloha vůči vtokové soustavě.



Obr. 3.7. Model zkušebních destiček s lící soustavou.



Současně byly odlévány i odlitky Y bloků, typ II (obr. 3.8.), a také vzorky pro zjištění chemického složení litiny (destičky průměru 35 x 5 mm, ve slévárenské praxi nazývané „medaile“). Tyto vzorky byly podrobeny spektrální analýze.



Obr. 3.8. Odlitek Y bloku

(A značí část bloku pro výrobu zkušební tyče a měření tvrdosti, B je nálietek)

Tabulka 3.6. Přehled odlévání zkušebních tělísek

Charakter zkušebních odlitků

Označení tavby	Destičky	Y - blok	Zkušební tyč Ø 30 x 115 mm
Číslo 1	ano	Ano	ano
Číslo 2	ano	Ano	ano
Číslo 3	ano	Ano	ano
Číslo 4	ano	Ano	ano
Číslo 5	ano	Ano	ano
Číslo 6	ano	Ano	ano



Chemické složení vzorků taveb LKG s vyšším obsahem Si bylo provedeno pomocí spektrální analýzy. K tomuto účelu byl použit spektrální kvantometr firmy LECO v Komerční slévárně šedé a tvárné litiny v Turnově. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.7., tak jak byly získány analýzou vzorků jednotlivých taveb.

Tabulka 3.7. Přehled chemického složení jednotlivých taveb

Tavba číslo	Chemické složení [%]									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Sn	Al	Mg	Cu
1	3,41	2,70	0,035	0,022	0,006	0,022	0,035	0,017	0,022	0,009
2	3,43	3,83	0,010	0,025	0,009	0,011	0,010	0,029	0,038	0,011
3	2,96	3,49	0,220	0,027	0,008	0,016	0,009	0,021	0,039	0,012
4	3,51	3,86	0,180	0,028	0,006	0,011	0,005	0,029	0,040	0,033
5	3,37	3,47	0,145	0,024	0,006	0,014	0,010	0,022	0,041	0,069
6	3,34	4,10	0,133	0,025	0,005	0,022	0,007	0,019	0,037	0,053

3.4 Popis prováděných experimentů výroby odlitků

Na základě vyrobených slévárenských forem a připraveny taveniny, u které byla provedena modifikace a očkování podle výše uvedené metodiky. Bylo provedeno odlití do příslušných slévárenských forem. Po ztuhnutí a chladnutí byly odlitky vytlučeny z forem a podrobeny dalšímu zkoumání (analýze).

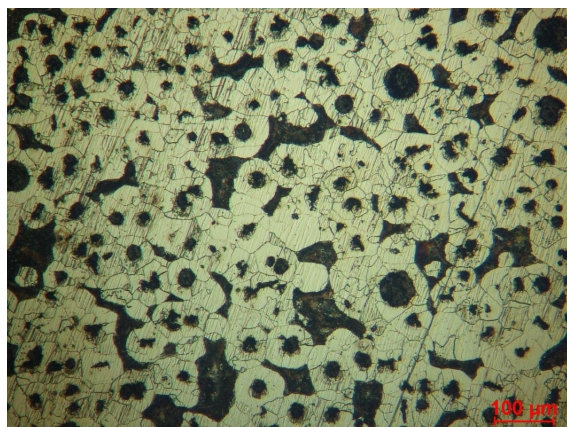
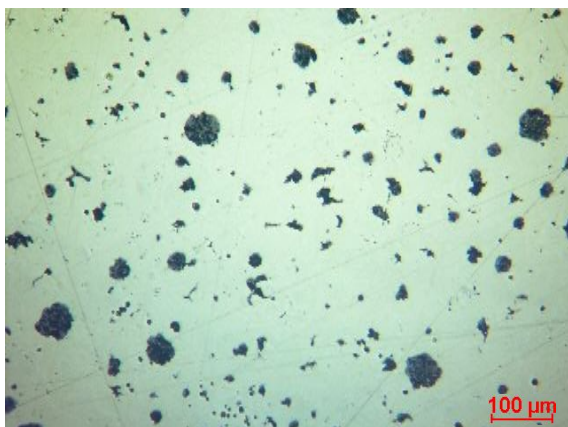
3.4.1. Metalografické hodnocení struktury odlitků

Vzorky pro metalografické pozorování byly odřezány ze zkušebních destiček a tyčí, pomocí strojní rámové pily s chlazením, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění struktury. Vzorky odlitků pro metalografické pozorování byly připraveny běžným metalografickým způsobem (zality do Dentacrylové pryskyřice a řádně označeny, broušeny na metalografických bruskách a leštěny na leštících kotoučích s použitím leštící kapaliny pro litinu). Metalografické pozorování struktury připravených vzorků bylo provedeno na světelném mikroskopu Neophot 21 (výrobce Carl Zeiss Jena, SRN). Vzorky byly na mikroskopu pozorovány v neleptaném a leptaném stavu při 100 a 500 násobném zvětšení. K naleptání struktury litiny byl použit Nital 2,5. Při sledování tvaru, velikosti a rozložení grafitu byly metalografické vzorky sledovány v neleptaném stavu dle ČSN 420461 při zvětšení 100 násobném. V naleptaném stavu byla hodnocena struktura základní kovové hmoty (matrice) litiny při zvětšení 100 a 500 násobném. Získané struktury byly sledovány digitální kamerou a vyhodnoceny pomocí normy ČSN 42 0461. Získané struktury vzorků



jsou zaznamenány na níže uvedených obrázcích 3.9 až 3.14., vždy jeden vzorek z tavby (destička tloušťky 7 mm). Zbýlé obrázky obsahuje příloha. Výsledné hodnocení struktury všech destiček je v tabulce 3.7.

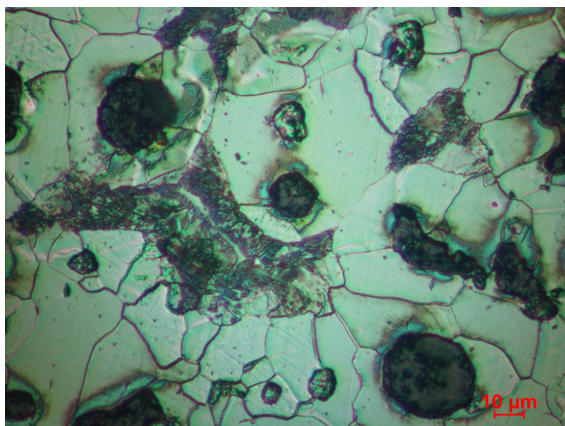
Tavba číslo 1





a)

b)



c)

a) tvar, velikost a rozložení grafitu – neleptaný stav

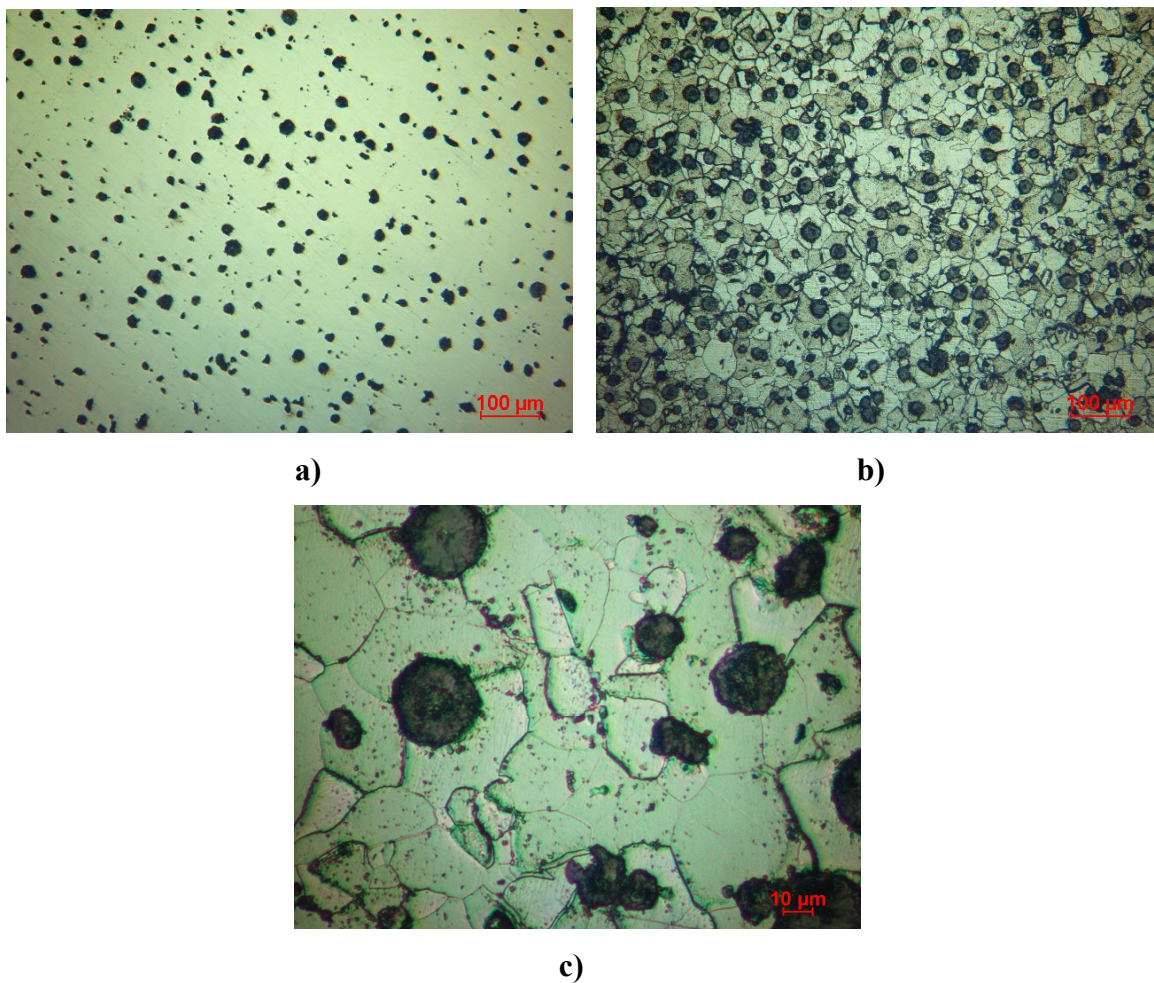
b), c) struktura litiny s kuličkovým grafitem – leptáno Nital 2,5

Obr. 3.9 Struktura litiny s kuličkovým grafitem, destička 7mm

Hodnocení struktury litiny s kuličkovým grafitem bylo provedeno podle ČSN 42 0461.

Z obr. 3.9. je patrné, že tvar grafitu je z 50% pravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 6, tj od 0 do 60μm a 50% nepravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 7 to je od 0 do 30μm. Základní kovová hmota litiny je feriticko-perlitická s obsahem perlitu 2 až 10% (P6), jak je patrné z obr. 3.9b.,3.9.c.

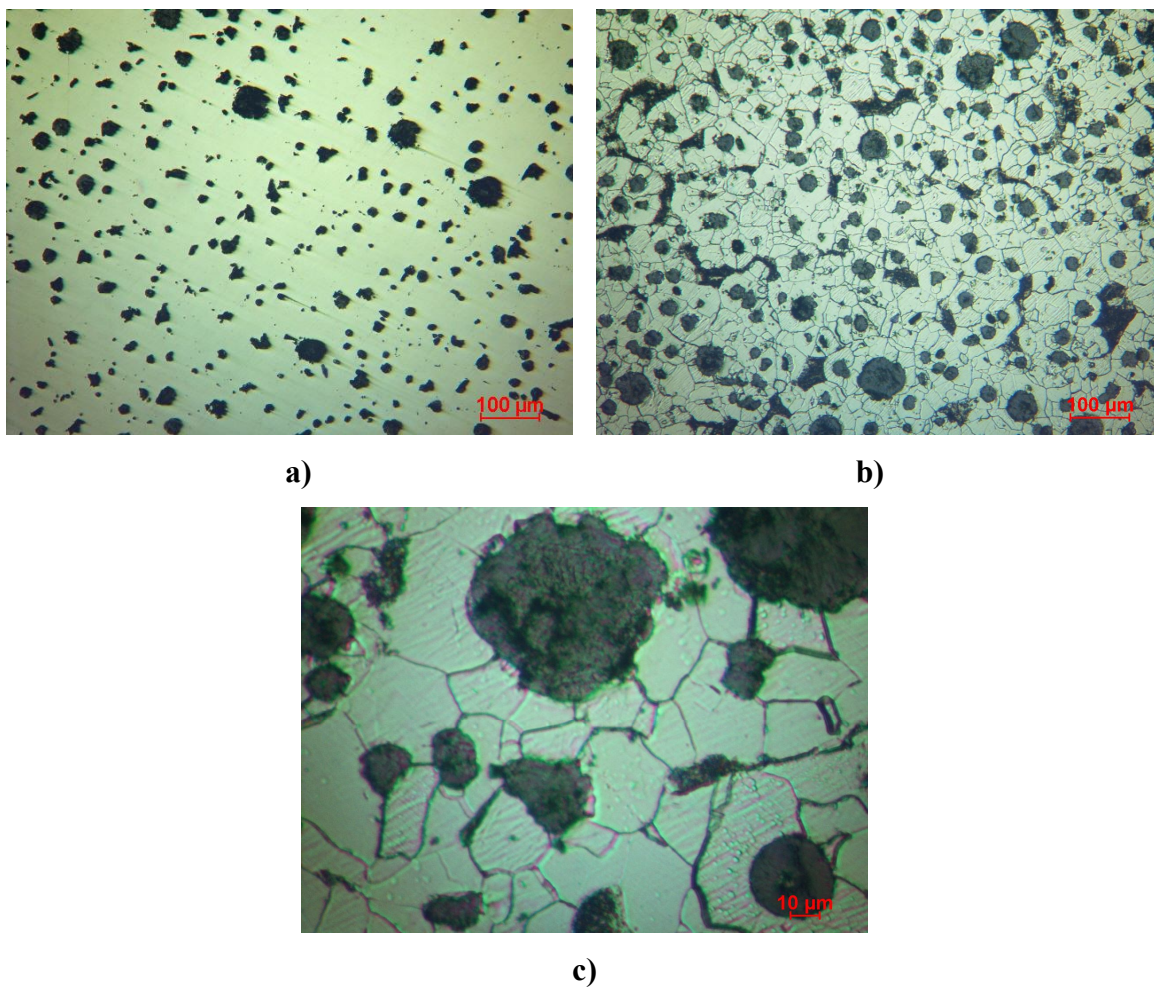
Tavba číslo 2



a) tvar, velikost a rozložení grafitu – neleptaný stav
b), c) struktura litiny s kuličkovým grafitem – leptáno Nital 2,5

Obr. 3.10 Struktura litiny s kuličkovým grafitem, destička 7mm

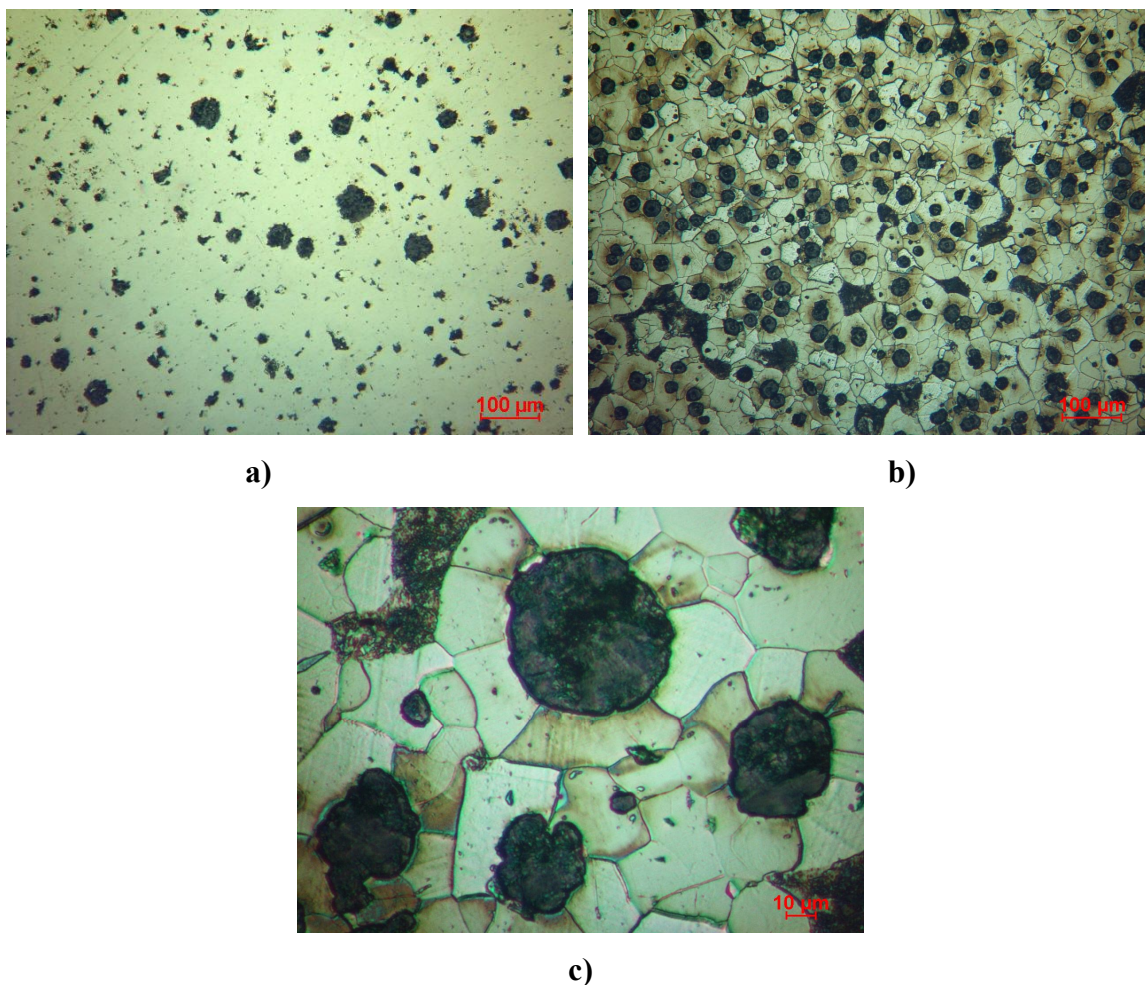
Hodnocení struktury litiny s kuličkovým grafitem bylo provedeno podle ČSN 42 0461. Z obr. 3.10. je patrné, že tvar grafitu je z 90% pravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 7, to je od 0 do 30 μ m a 10% nepravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8, to je od 0 do 15 μ m. Základní kovová hmota litiny je feritická s obsahem do 2% perlitu (P0), jak je patrné z obr. 3.10b., 3.10.c.



a) tvar, velikost a rozložení grafitu – neleptaný stav
b), c) struktura litiny s kuličkovým grafitem – leptáno Nital 2,5

Obr. 3.11 Struktura litiny s kuličkovým grafitem, destička 7mm

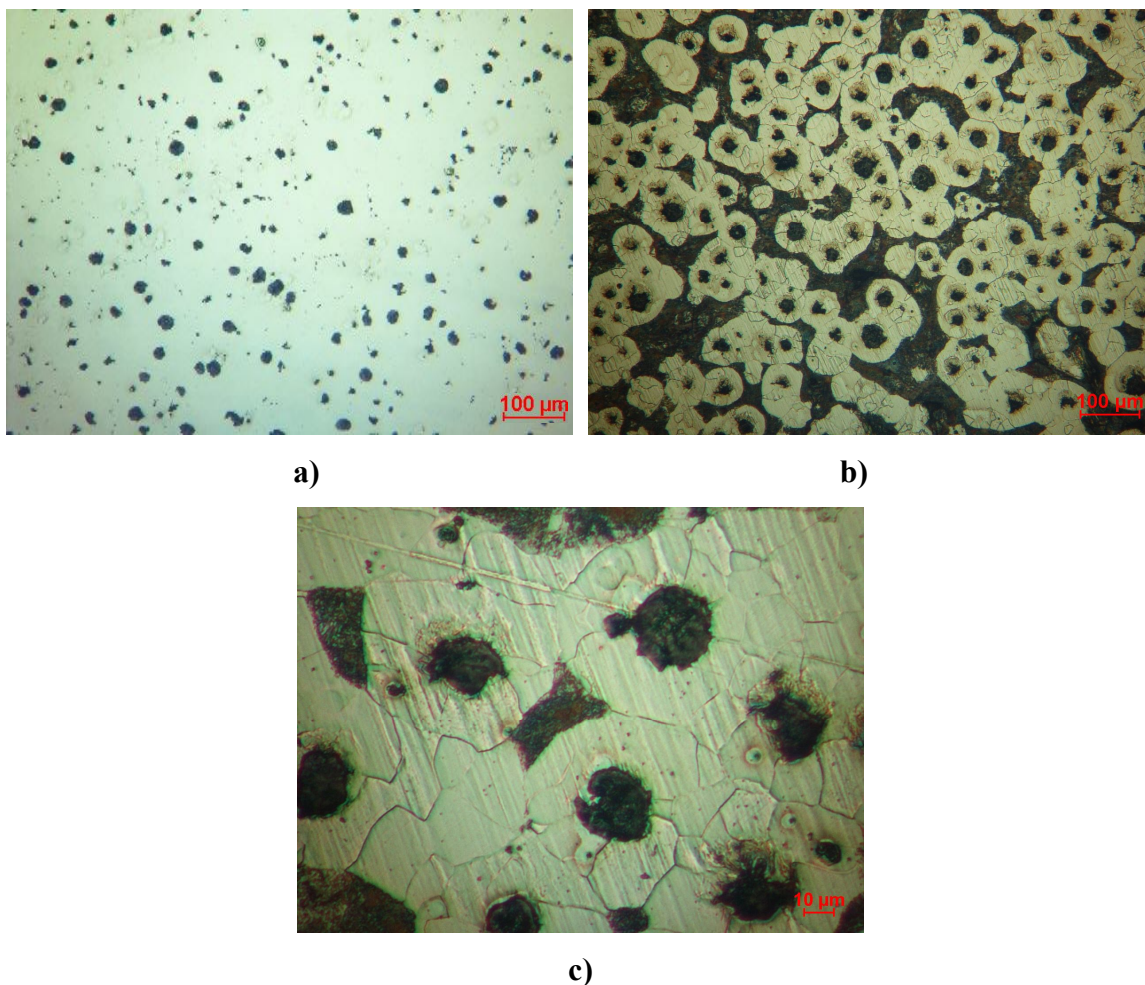
Hodnocení struktury litiny s kuličkovým grafitem bylo provedeno podle ČSN 42 0461. Z obr. 3.11. je patrné, že tvar grafitu je z 80% pravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 6, to je od 0 do 60μm a 20% nepravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 7, to je od 0 do 30μm. Základní kovová hmota litiny je feritická s obsahem od 2 do 10% perlitu (P6), jak je patrné z obr. 3.11b., 3.11.c.



a) tvar, velikost a rozložení grafitu – neleptaný stav
b), c) struktura litiny s kuličkovým grafitem – leptáno Nital 2,5

Obr. 3.12 Struktura litiny s kuličkovým grafitem, destička 7mm

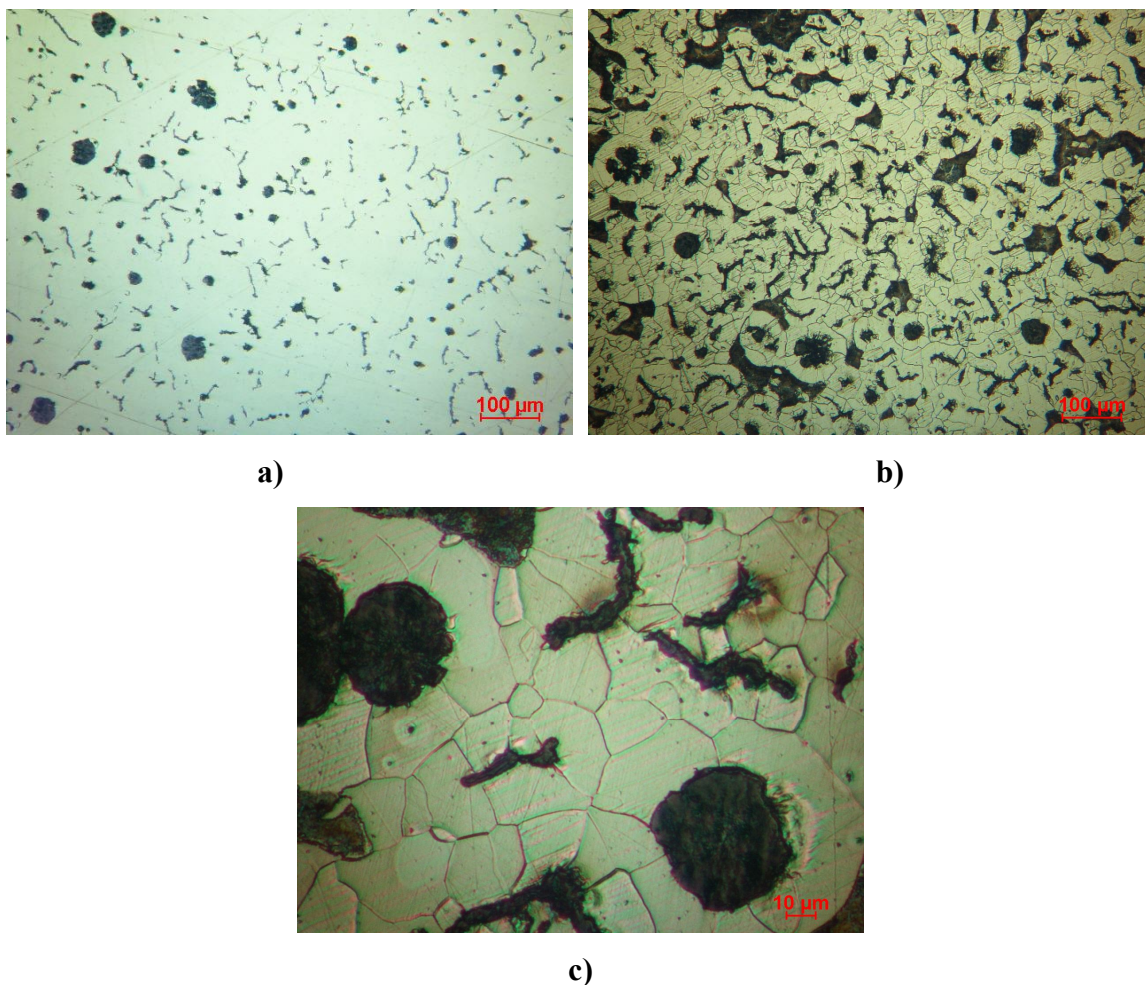
Hodnocení struktury litiny s kuličkovým grafitem bylo provedeno podle ČSN 42 0461. Z obr. 3.12. je patrné, že tvar grafitu je z 40% pravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 5, to je od 0 do 120 μ m a 60% nepravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 7, to je od 0 do 30 μ m. Základní kovová hmota litiny je feritická s obsahem od 2 do 10% perlitu (P6), jak je patrné z obr. 3.12.b., 3.12.c.



a) tvar, velikost a rozložení grafitu – neleptaný stav
b), c) struktura litiny s kuličkovým grafitem – leptáno Nital 2,5

Obr. 3.13 Struktura litiny s kuličkovým grafitem, destička 7mm

Hodnocení struktury litiny s kuličkovým grafitem bylo provedeno podle ČSN 42 0461. Z obr. 3.13. je patrné, že tvar grafitu je z 65% pravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 7, to je od 0 do 30µm a 35% nepravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 7, to je od 0 do 30µm. Základní kovová hmota litiny je feritická s obsahem od 10 do 30% perlitu (P20), jak je patrné z obr. 3.13.b., 3.13.c.



a) tvar, velikost a rozložení grafitu – neleptaný stav
b), c) struktura litiny s kuličkovým grafitem – leptáno Nital 2,5

Obr. 3.14 Struktura litiny s kuličkovým grafitem, destička 7mm

Hodnocení struktury litiny s kuličkovým grafitem bylo provedeno podle ČSN 42 0461. Z obr. 3.14. je patrné, že tvar grafitu je z 70 % červíkovitý, velikost grafitu je 7 až 6, to je od 15 do 60 μm a 10% nepravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 7, to je od 0 do 30 μm a 10% npravidelně zrnitý, velikost grafitu je 8 až 7, to je od 0 do 30 μm Základní kovová hmota litiny je feritická s obsahem od 2 do 10% perlitu (P6), jak je patrné z obr. 3.14.b., 3.14.c.

Tabulka 3.8. Metalografické hodnocení destiček (hodnocení proběhlo na leptaných i neleptaných vzorcích při 100 a 500 násobném zvětšení dle normy ČSN 42 0461)

Tavba	Obsah	Tloušťka	Struktura litiny
-------	-------	----------	------------------



číslo	křemíku [%]	destičky [mm]	Tvar a velikost grafitu	Charakter základní hmoty
1	2,7	3	70% VI 8, 30% V 8	P20
		4	90% VI 8-7, 10% V 8	P20
		5	80% VI 8-6, 20% V 8-7	P20
		7	80% VI 8-6, 20% V 8-6	P6
		10	70% VI 7-6, 30% V 7	P6
2	3,83	3	70% VI 8 -7, 30% V 7	P0
		4	80% VI 8-7, 20% V 7	P0
		5	50% VI 8-7, 50% V 8-6	P0
		7	90% VI 8-7, 10% V 8	P0
		10	80% VI 7-8, 20% V 8	P0
3	3,49	3	80% VI 7-8, 20% V 8	P6
		4	90% VI 8-6, 10% V 8	P20
		5	60% VI 8-6, 40% V 8	P20
		7	70% VI 8-6, 30% V 7	P6
		10	70% VI 8-5, 30% V 8-7	P6
4	3,86	3	60% VI 8-6, 40% V 8	P20
		4	50% VI 8-6, 50% V 8-6	P20
		5	25% VI 7-6, 75% V 8-7	P20
		7	40% VI 7-5, 60% V 8-7	P6
		10	50% VI 7-5, 50% V 8-7	P6
5	3,47	3	70% VI 7-5, 30% V 7	P45
		4	50% VI 8-7, 50% V 8-7	P45
		5	30% VI 8-7, 70% V 8-7	P45
		7	60% VI 8-7, 40% V 8-7	P20
		10	70% VI 8-6, 30% V 8-7	P20
6	4,1	3	30% VI 8-7, 60% V 8-7, 10% III 7	P20
		4	30% VI 8, 50% V 8-6, 30% III 7	P6
		5	20% VI 8-6, 10% V 7, 70% III 7-6	P2
		7	20% VI 7-6, 10% V 7, 70% III 7-6	P6
		10	30% VI 8, 30% V 8-7, 40% III 7-6	P2

Tvar grafitu : **III**- červinkovitý, **V**-nedokonale zrnitý, **VI**- pravidelně zrnitý

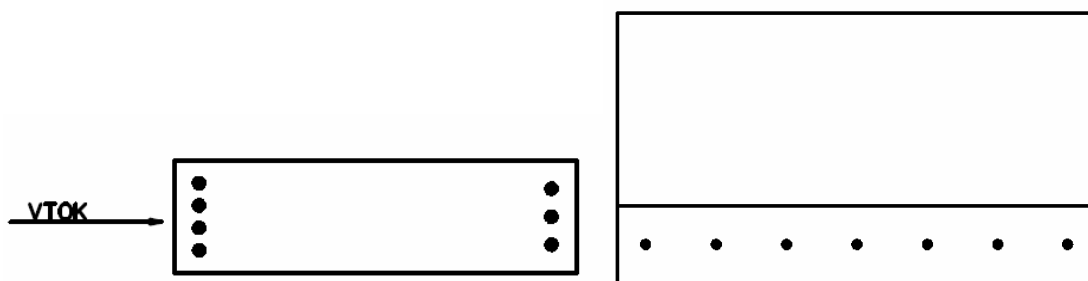
Velikost grafitu: **8**= do 15μm, **7**=nad 15 do 30μm, **6**=nad 30 do 60μm, **5**=nad 60 do 120μm

Obsah perlitu: **P0**= do 2%, **P6**= nad 2 do 10%, **P20**= nad 10 do 30%, **P45**= nad 30 do 60%



3.4.2. Měření tvrdosti

Měření tvrdosti bylo prováděno na odlitých zkušebních destičkách s různou tloušťkou stěny a na odlitcích Y bloků. Pro měření tvrdosti byla použita metoda podle Brinella, použit byl tvrdoměr firmy Carl Weiss. Zkušebním tělískem (indentorem) byla kulička z kalené oceli o průměru 5 mm, zatížení 7355 N (750 kp) a doba měření tvrdosti přibližně 30 s. Pomocí optického měřidla byly změřeny dva na sebe kolmé průměry zhotoveného vtisku. Z těchto dvou průměrů byla stanovena střední hodnota průměru vtisku a z něho vyplývá výsledná tvrdost. Odlitky byly před měřením tvrdosti obroušeny a zbaveny licí kůry a nečistot. Tvrdost na destičkách se měřila ve čtyřech bodech u vtoku a ve třech bodech na opačném konci (obr. 3.15.) a na Y blocích byla měřena na sedmi místech rovnoměrně po celé délce v dolní části bloku (obr. 3.15.)



Obr. 3.15. místa provádění vtisku na zkušebních vzorcích
(vlevo - destičky, vpravo - Y blok)

Naměřené hodnoty byly statisticky vyhodnoceny podle níže uvedených vztahů (3.1., 3.2.), a to jak pro jednotlivé tloušťky, tak pro celou tavbu. Dále byla stanovena minimální a maximální hodnota tavby a jejich rozdíl.

Odhad střední hodnoty
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum x_i \quad (3.1.)$$

Střední směrodatná odchylka
$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2.)$$

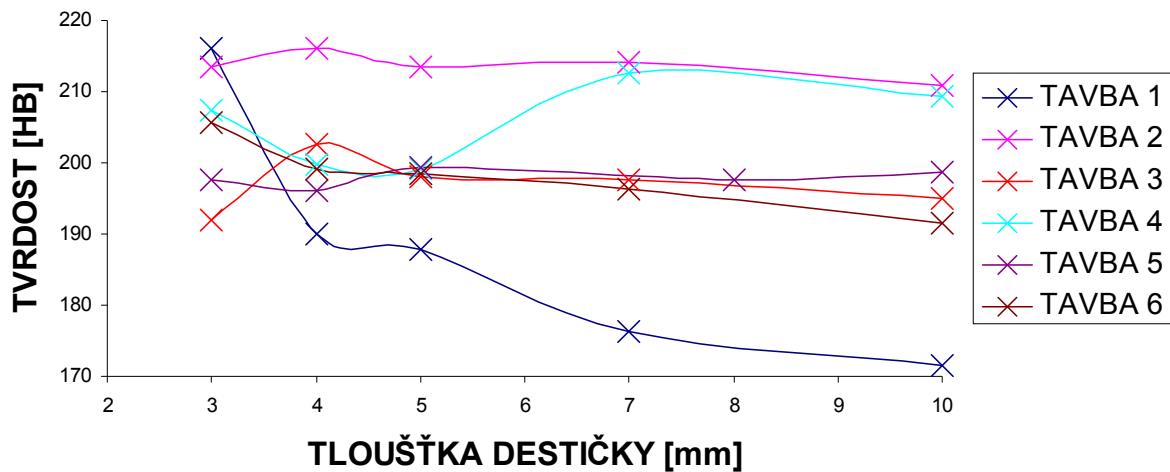


Tabulka 3.9. Hodnoty tvrdosti zkušebních destiček a jejich statistické vyhodnocení.

Číslo tavby	Tloušťka destičky [mm]	Tvrdost [HB]							\bar{x} tvrdosti [HB]	$\bar{\sigma}$ tvrdosti [HB]	\bar{x} tvrdosti tavby [HB]	$\bar{\sigma}$ tvrdosti tavby [HB]	MIN tvrdost v tavbě [HB]	MAX tvrdost v tavbě [HB]	MAX- MIN [HB]
1	3	185	203	215	225	229	226	230	216	17	188	21	161	230	69
	4	161	169	185	185	207	213	210	190	21					
	5	170	175	181	187	195	202	205	188	13					
	7	168	172	175	177	176	181	185	176	6					
	10	165	168	171	173	172	175	177	172	4					
2	3	207	211	215	213	214	215	220	214	4	214	4	207	223	16
	4	211	212	215	215	217	220	223	216	4					
	5	209	211	212	212	215	215	220	213	4					
	7	210	210	211	215	215	218	220	214	4					
	10	207	209	211	210	211	212	216	211	3					
3	3	191	190	189	190	192	195	197	192	3	197	5	189	209	20
	4	197	195	201	204	206	207	209	203	5					
	5	193	195	198	200	198	202	201	198	3					
	7	190	195	200	202	200	197	200	198	4					
	10	189	192	192	199	200	198	195	195	4					
4	3	200	209	209	211	205	207	210	207	4	205	6	193	215	22
	4	195	198	198	199	200	202	207	200	4					
	5	193	195	195	200	201	205	205	199	5					
	7	209	215	211	215	215	211	213	213	2					
	10	212	209	209	209	207	209	211	209	2					
5	3	195	191	191	204	198	200	204	198	6	198	6	189	209	20
	4	191	189	195	198	202	189	209	196	7					
	5	191	198	189	200	202	207	209	199	8					
	8	193	193	195	200	201	198	204	198	4					
	10	191	193	193	202	200	203	209	199	7					
6	3	191	189	210	211	211	213	215	206	11	198	7	183	215	32
	4	189	193	193	195	204	207	213	199	9					
	5	191	193	193	197	205	203	207	198	7					
	7	186	186	195	193	200	205	209	196	9					
	10	184	183	187	189	194	198	205	191	8					

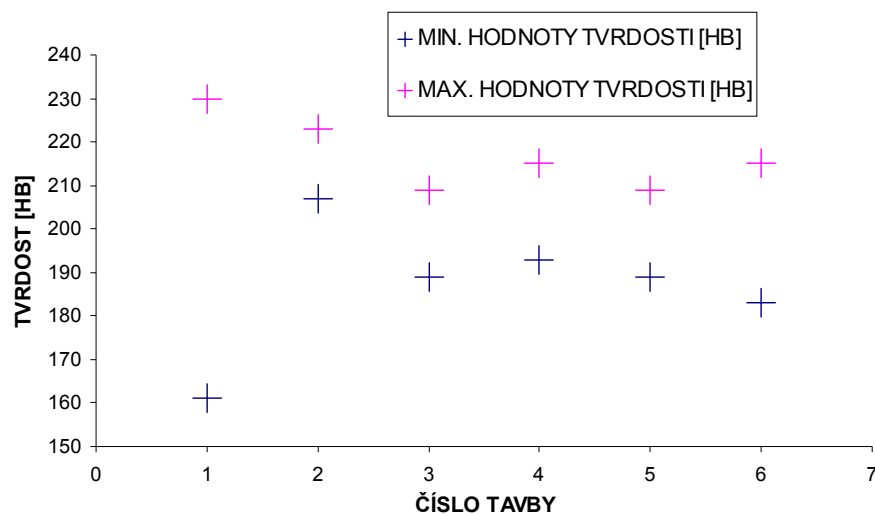


STŘEDNÍ HODNOTY TVRDOSTI PRO DANÉ TLOUŠŤKY DESTIČEK



Obr. 3.16. Střední hodnota tvrdosti jednotlivých pro jednotlivé tloušťky

ROZDÍL MEZI MINIMÁLNÍ A MAXIMÁLNÍ HODNOTOU [HB]



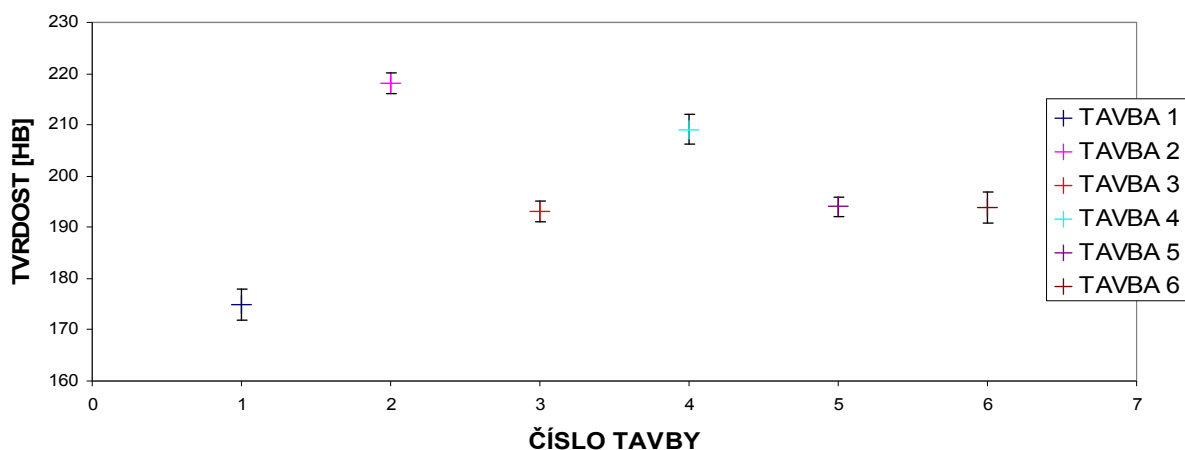
Obr. 3.17. Rozsah tvrdosti u zkušebních destiček(3,4,5,7,10mm) v dané tavbě



Tabulka 3.9. Hodnoty tvrdosti Y bloků a jejich statistické vyhodnocení

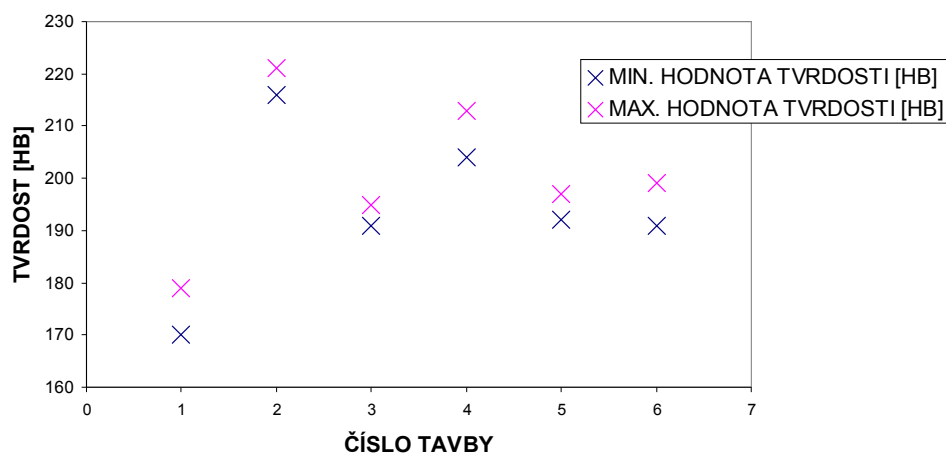
Číslo tavby	Tvrdost [HB]							\bar{x} tvrdosti [HB]	$\bar{\sigma}$ tvrdosti [HB]	MIN tvrdost [HB]	MAX tvrdost [HB]	MAX- MIN [HB]
1	170	171	175	176	176	178	179	175	3,4	170	179	9
2	221	216	217	220	218	219	216	218	2,0	216	221	5
3	191	195	194	192	193	192	195	193	1,6	191	195	4
4	204	209	207	209	209	213	213	209	3,2	204	213	9
5	192	193	194	195	193	194	197	194	1,6	192	197	5
6	193	194	191	192	191	197	199	194	3,1	191	199	8

STŘEDNÍ HODNOTA SE SMĚRODATNOU ODCHYLKOU TVRDOSTI



Obr. 3.18. Střední hodnota tvrdosti se směrodatnou odchylkou pro daný Y blok

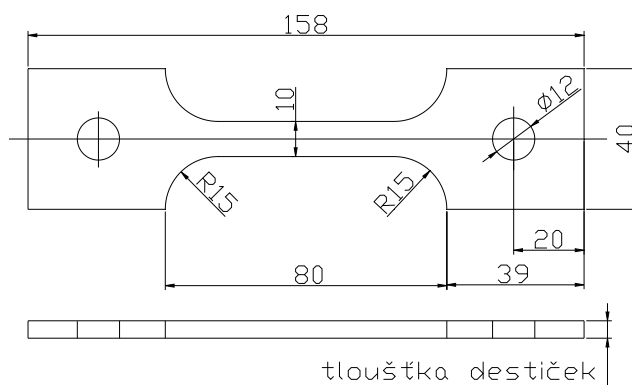
ROZSAH TVRDOSTÍ PRO JEDNOTLIVÉ Y BLOKY



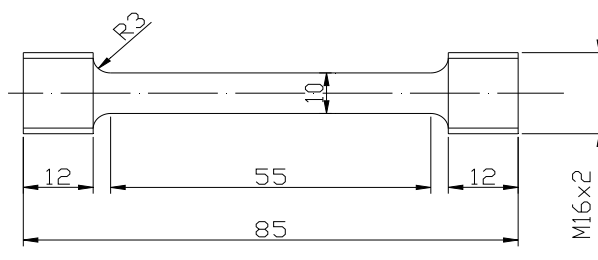
Obr. 3.19. Rozsah tvrdostí daného Y bloku

3.4.3. Sledování pevnosti v tahu

Vzorky pro tyto účely byly získány z odlitků destiček a Y bloků. Tvar zkušebních vzorků pro sledování pevnosti destiček je patrný z obr. 3.20. Tvar zkušebních vzorků pro sledování pevnosti Y bloků je na obr. 3.21. Tvar zkušebního vzorku byl vyroben dle ČSN EN 1563. Zkušební destičky byly obroušeny a zbaveny licí kůry.



Obr. 3.20. Rozměry zkušebního vzorku destiček (tloušťky 3,4,5,7,10mm). [4]



Obr. 3.21. Rozměry zkušební tyče pro zkoušku tahem vyrobené z Y bloku, ČSN EN 1563. [4]

Pro měření pevnosti v tahu byl použit trhací stroj TIRA test 2300 a laserový extenzometr (firmy Fiedler optoelektronik GmbH), který slouží k zaznamenání prodloužení.

Pro měření pevnosti v tahu vzorků LKG s vyšším obsahem Si, bylo použito měřicí zařízení, které je na naší katedře (KSP-FS, TU Liberec). Toto zařízení je tvořeno univerzálním trhačím strojem TIRA test 2300, který je opatřený bezdotykovým laserovým extenzometru (fy. Fiedler Optoelektronik GmbH). Tento stroj může vyvodit maximální tahovou sílu 100 kN. Tahová síla je měřena pomocí odporových tenzometrů zabudovaných přímo na upínacím zařízení trhačího stroje, který má vyměnitelné čelisti pro upínání čtvercových tyčí s otvorem pro čep. Konstrukce čtvercových tyčí s otvorem pro čep



v kombinaci s konstrukcí čelistí stroje a zakalených čepů, vylučuje možnost přídatných ohybových momentů.

Laserový extenzometr, je založen na bezkontaktním měření lokálně rozloženého tahového napětí na různých vzorcích při jednoosé tahové zkoušce. Na připravené vzorky byly po změření jeho průřezu dřívku nanесeny kontrastující značky ve vzdálenosti $l_0 = 50$ mm. Tyto hodnoty rozměry dřívku zkušebních vzorků byly zapsány. Pak následovalo upnutí zkušebního vzorku do čelistí trhačního stroje a nastavení přesné polohy laserového extenzometru vůči vzorku. S ohledem na šířku laserového paprsku, která je 55 mm (pro nastavení skenující oblasti na zkušebním vzorku, je třeba brát v úvahu prodloužení vzorku, aby se značky nedostaly mimo měřenou oblast). Doporučovaná vzdálenost laserového extenzometru od vzorku je zhruba 200 mm, pro co nejlepší citlivost zařízení. Pomocí programu LGM, který je součástí vybavení trhačního stroje, byla provedena kontrola správnosti nastavení měřícího zařízení. Pak následovalo nastavení veškerých parametrů zkušebního vzorku (rozměry, umístění značek) v programu LOMP. Postupným zatěžováním vzorku vnější tahovou silou dojde k přetržení vzorku. Data tahového napětí z trhačního zařízení se digitálně zpracovávají v softwaru LOM. Tento software zaznamenává sílu a optimalizuje příčné zúžení a další data experimentu, která dále synchronizuje s poměrným prodloužením vzorku. Registrovaná naměřená data jsou zobrazována na monitoru zařízení. Současně jsou ukládána do souboru a následně analyzována softwarem LQA. Naměřené a digitálně zpracované hodnoty z programu LQA jsou uvedeny v tabulce 3.10..

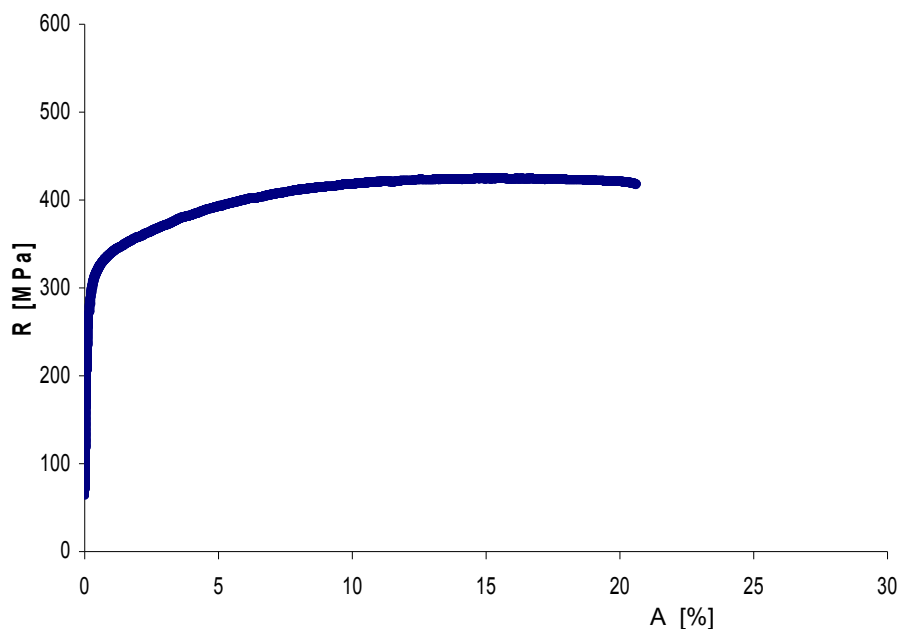


Tabulka 3.10. Průměrné hodnoty pevnosti a tažnosti zpracované programem LQA.

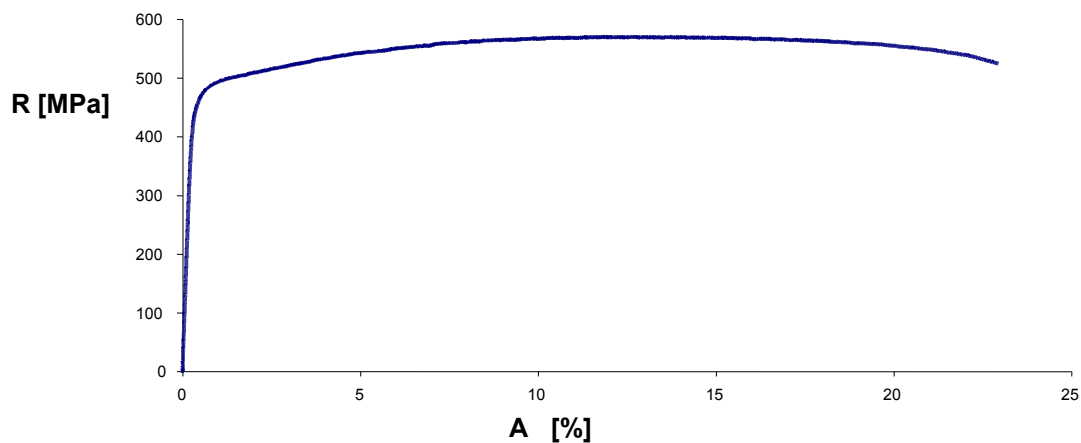
Číslo tavby	Tloušťka destičky [mm]	Rm [MPa]	A [%]
1	3	472	1,9
	4	455	2,5
	5	447	4,3
	7	360	2,3
	10	395	4,8
	Y blok	440	20,70
2	3	460	0,6
	4	405	0,4
	5	480	0,9
	7	385	0,5
	10	492	2,0
	Y blok	570	23,4
3	3	505	5,2
	4	520	6,6
	5	480	3,8
	7	495	5,6
	10	390	3,6
	Y blok	505	22,4
4	3	540	2,83
	4	565	4,70
	5	450	0,87
	7	310	0,50
	10	415	3,2
	Y blok	530	23,10
5	3	540	3,2
	4	570	6,3
	5	550	7,8
	7	390	1,5
	10	355	2,6
	Y blok	500	24,10
6	3	540	2,4
	4	485	1,0
	5	520	2,90
	7	490	1,80
	10	425	2,0
	Y blok	495	25,3



Ukázka závislosti pevnosti v tahu na deformaci pro zkušební tyč z Y bloku je pro ilustraci uvedena na obr. 22.a 23.



Obr. 3.22. Závislost pevnosti v tahu a prodloužení, zkušební tyč z Y bloku (tavba č.1).



Obr. 3.23. Závislost pevnosti v tahu a prodloužení, zkušební tyč z Y bloku (tavba č.2)



3.5. Simulační výpočet tuhnutí litiny s kuličkovým grafitem

V rámci komplexního řešení diplomové práce jsem doplnil experimentální část diplomové práce o provedení simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí odlitků tvaru destiček, stejných rozměrů jako těch, které byly použity u výše uvedených experimentů.

Pro účel simulačního výpočtu byl použit slévárenský simulační program Quick CAST.

3.5.1 Princip výpočtu

Program QuickCast využívá pro numerické řešení lití strukturovanou metodu konečných objemů. Tato metoda je podobná metodě konečných diferencí. Metoda, jak již název napovídá, vyžaduje pravoúhlou síť tvořenou pravidelnými kolmými rovnoběžníky a s možností zavedení faktorů pro lepší zachycení vnější hranice oblasti pomocí zjemnění. Výpočet hodnoty rychlosti a teploty je řešen na předsazených sítích, rychlost se počítá ve středech stěn daného elementu a teplota se počítá ve středu elementu.

Výpočet teploty v sobě zahrnuje tři členy, které popisují vedení tepla. Těmito členy jsou konvekce, která popisuje přenos tepla proudící tekutinou, advekce která popisuje vedení tepla materiálem a posledním je entalpie, která je dána změnou teploty. Konvekce a advekce se řeší v jedné rovnici (3.3.). Entalpie je pak přímo počítána z tepelného toku konvekce a advekce

$$\frac{\partial H}{\partial t} = q + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) - T \text{div}\vec{V} \quad (3.3.)$$

Pro výpočty s fázovou změnou se počítají pomocí zákonů materiálových vlastností. Pro slitiny se pak entalpie pomocí vztahu (3.4.)

$$h(T) = \int_0^T c_p dT + L(1 - f_s(T)) \quad (3.4)$$

kde c_p je specifické teplo, L je latentní teplo a f_s pevná fáze. Hodnoty těchto parametrů jsou brány z termodynamické databáze nebo z experimentů (zavedení termočlánků do formy a z křivek chladnutí se určí potřebné hodnoty)

Výpočet proudění taveniny je dán rovnicí kontinuity (3.5.) a pohybovou rovnicí (3.6.) pro nestlačitelnou tekutinu .

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial x} = 0 \quad (3.5.)$$



$$\frac{\partial \rho \bar{U}}{\partial t} = \rho \bar{g} - \rho \overline{g \text{grad}(U)} - \overline{g \text{grad}(P)} - \mu \overline{\text{rot}(\text{rot}(U))} \quad (3.6.)$$

Jiný zápis v programu QuickCAST

$$\dot{u} = \frac{P}{M} + (D_{\mu} + A_p)u + F_g \quad (3.6.)$$

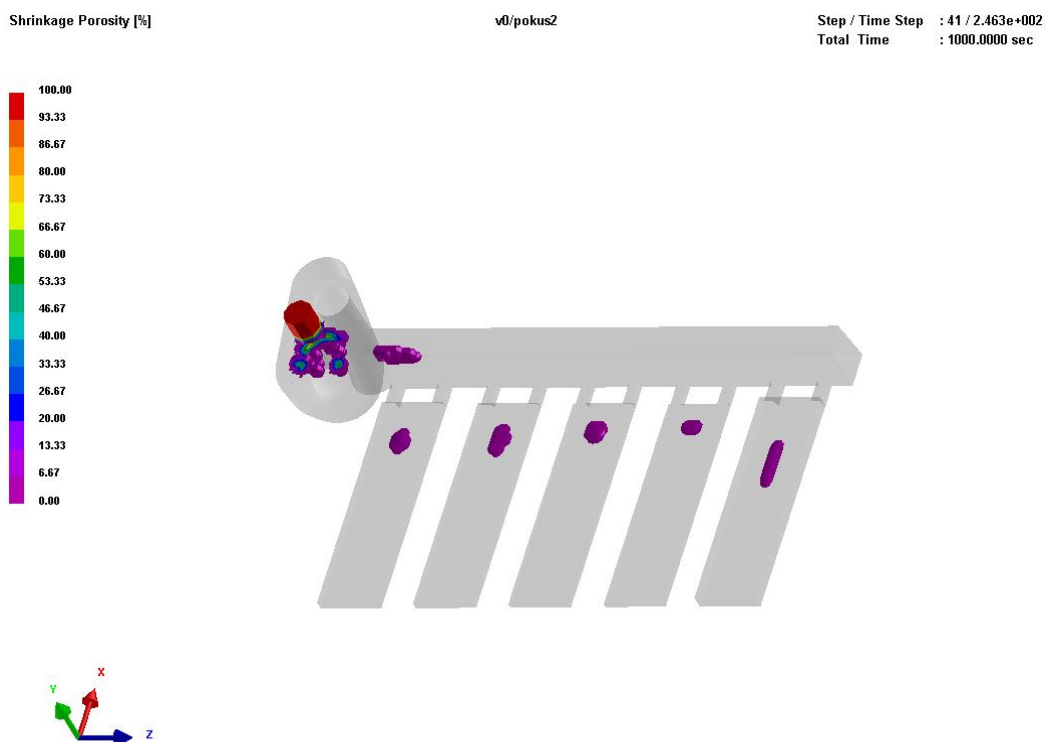
u je rychlost, M je matice hmotnosti, P matice tlaku, D_{μ} matice viskozity A_p matice hybnosti F_g vliv gravitace

Pro výpočet jsou používány ještě další vztahy a to přenos tepla mezi odlitkem a formou a pohyb zatuhlé vrstvy na čele taveniny.

3.5.2. Provádění simulace v programu Quick CAST

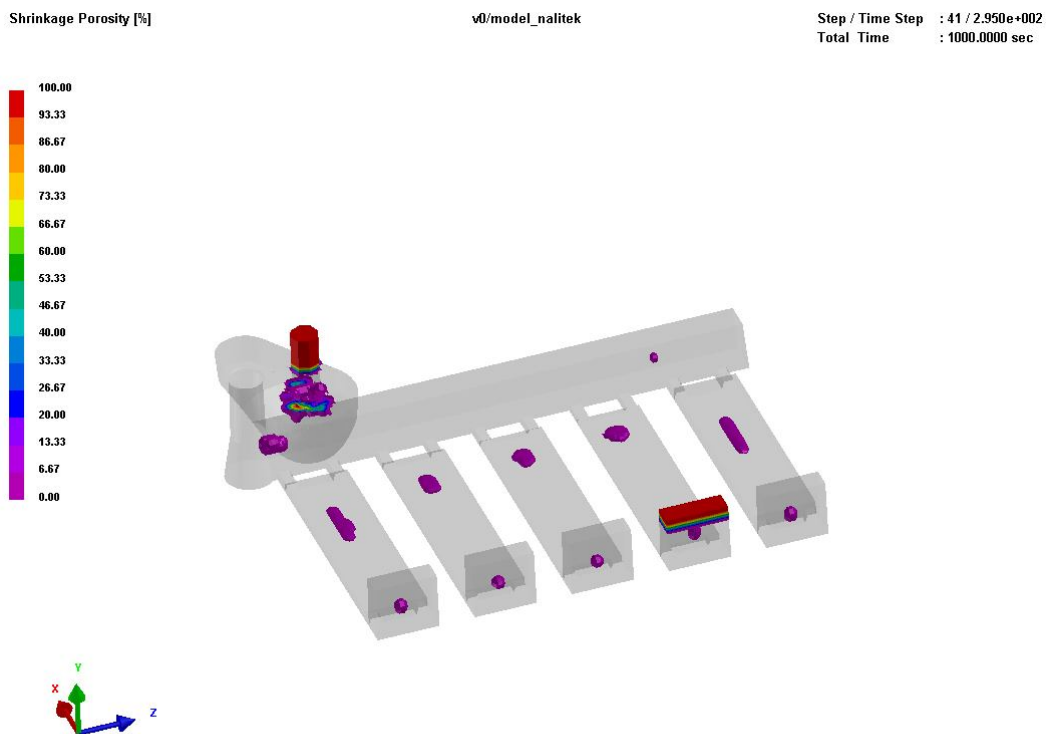
Jedná se o simulační program, kterým lze simulovat plnění, tuhnutí a chladnutí odlitku. Program pracuje na principu konečných objemů. Proto se musí model před samotným výpočtem upravit, tak aby byl tvořen z malých krychlí. Pro úpravu byl použit program Geomesch který model převede do potřebného formátu a model se převede do programu Quick CAST, kde se vytvoří forma a definuje se Inlet (simulace proudu taveniny z pánve). Nastaví se plocha na kterou působí okolní tlak vzduchu a vytvoří se síť tvořená krychlemi. Pro přesnější výpočet se místně zvětší hustota krychlí, aby krychle co nejvíce kopírovali tvar odlitku. Krok zvětšení, nebo zmenšení se volí přibližně okolo 10%. Po Vytvoření sítě se zadají okrajové podmínky: teplota taveniny, formy, okolí, materiál formy, odlitku. Zda dochází k ochlazování již při lití kovu, převrácená hodnota přenosu tepla mezi taveninou a formou, působení gravitační síly a další.

Pro simulaci byl vytvořen model dle stávajícího modelového zařízení (obr 3.7.), po simulaci bylo zjištěno že destičky (obr.3.24.) by mohli obsahovat poróznost, a tak se k destičkám připojili nálitky (obr. 3.25.), a došlo ke změně zářezu, kdy ze dvou lichoběžníkových vytvořil jeden obdélníkový po celé šířce destičky (obr. 3.26.). Tyto úpravy ovšem nevedli k odstranění poróznosti. Tepelné uzly vznikající v destičkách (obr. 3.31.) se nepodařilo odstranit nálitky (obr. 3.32.) a ani změnou zářezů (obr. 3.33.) Pro odstranění poróznosti by muselo dojít k přepočítání vtokové soustavy a zaměnit podtlakovou lící soustavu za přetlakovou provést novou simulaci. U podtlakové soustavy docházelo k odtrhávání proudu kovu a následné padání taveniny do taveniny, která již ve struskování byla a došlo tak jejímu víření (obr. 3.27. až 3.30.) tím se do taveniny dostával vzduch z dutiny formy. Na přiloženém CD je simulace lití, tuhnutí a chladnutí daných modelů



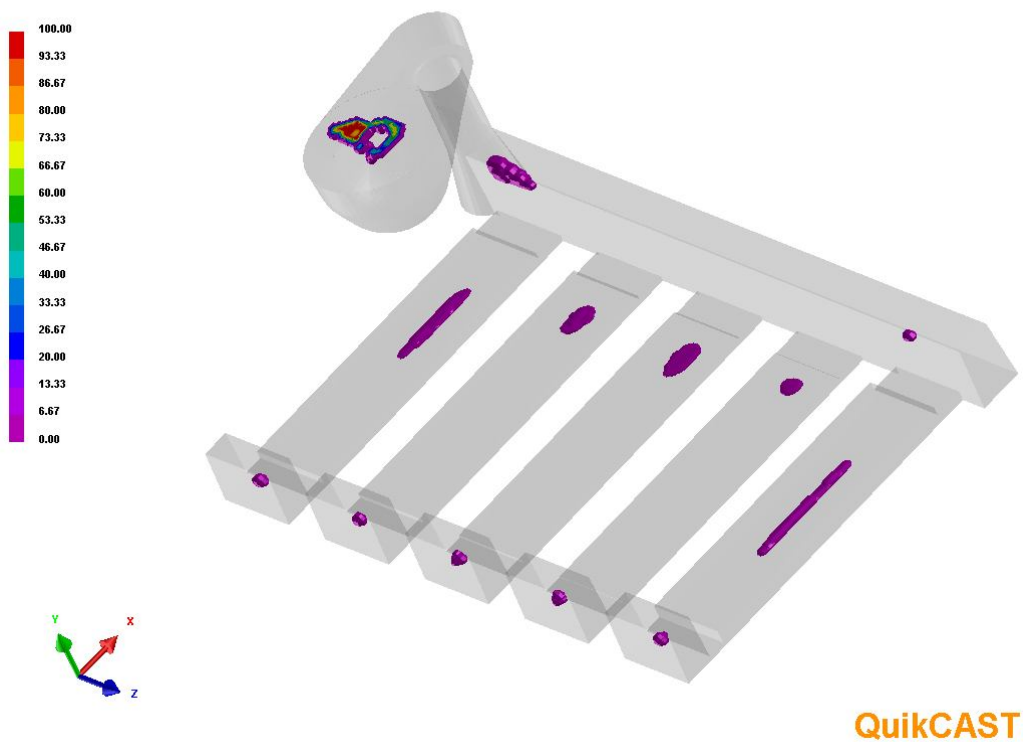
QuikCAST

Obr. 3.24. Simulace stávajícího modelového zařízení (porózita)

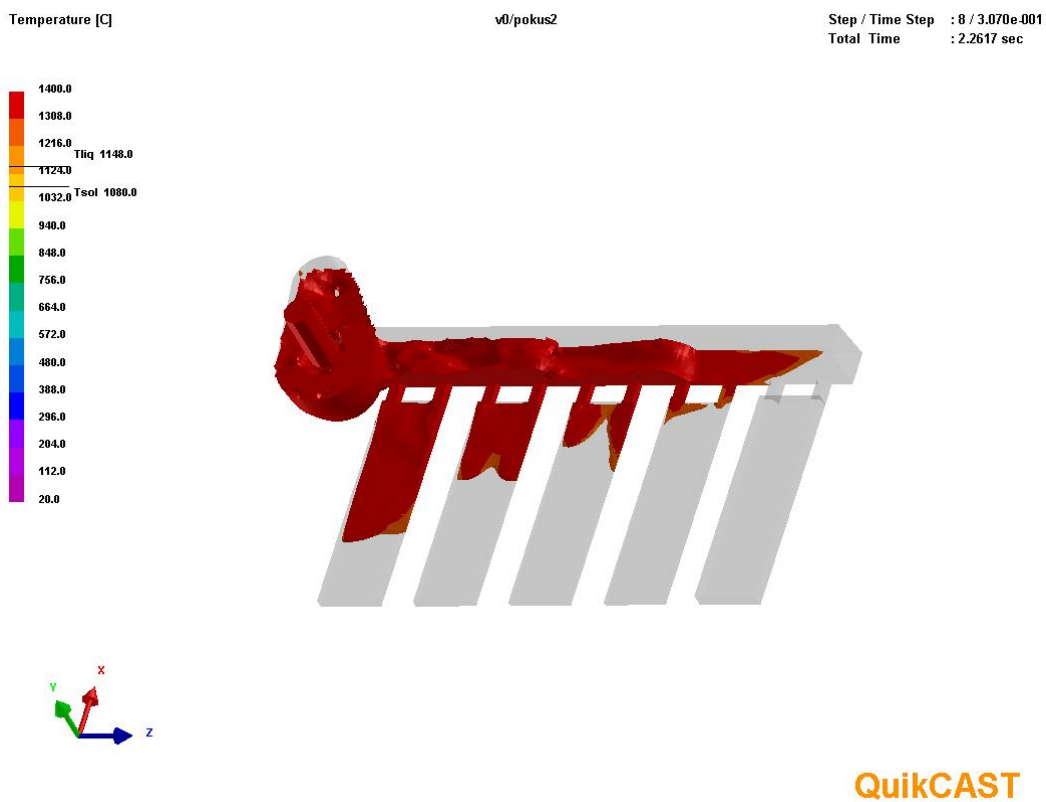


QuikCAST

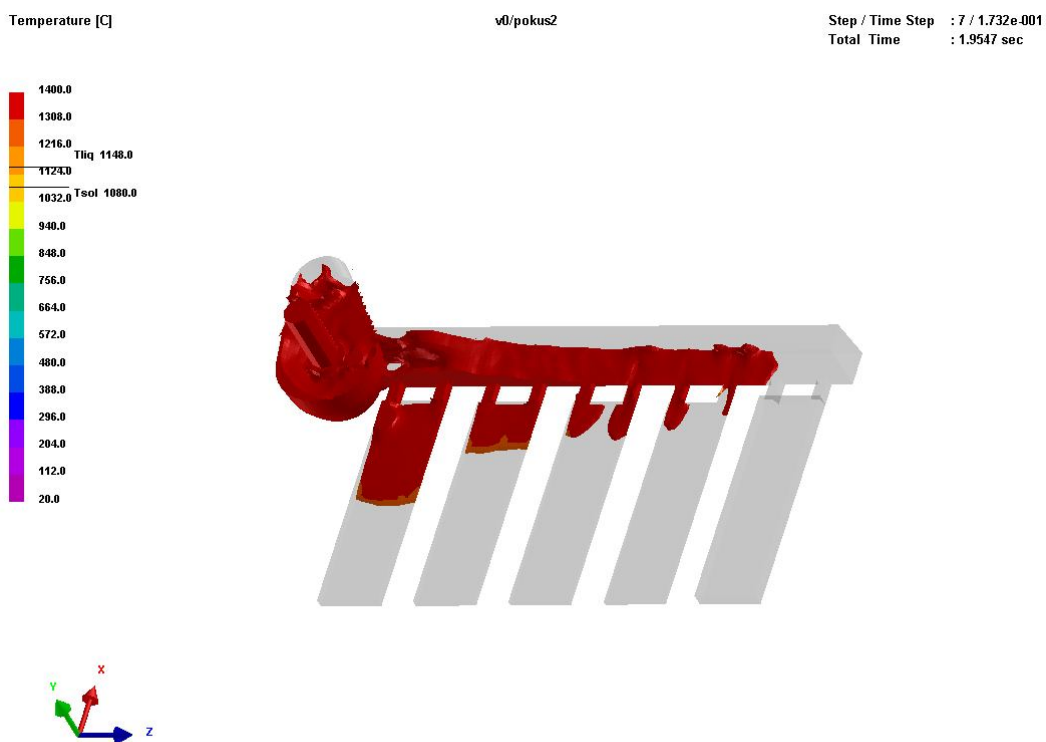
Obr. 3.25. Simulace stávajícího zařízení s přidáním nálitku (porózita)



Obr. 3.26. Simulace upravených zářezů a přidání nálitků (poróznost)

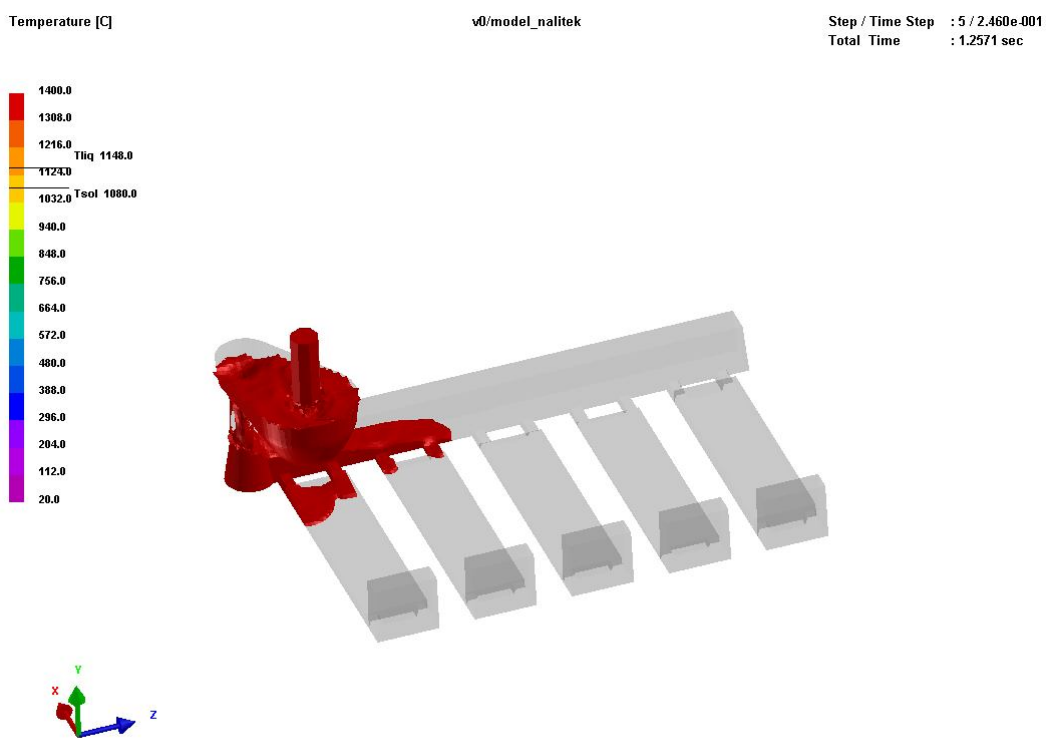


Obr. 3.27. Simulace stávajícího modelového zařízení (víření taveniny)



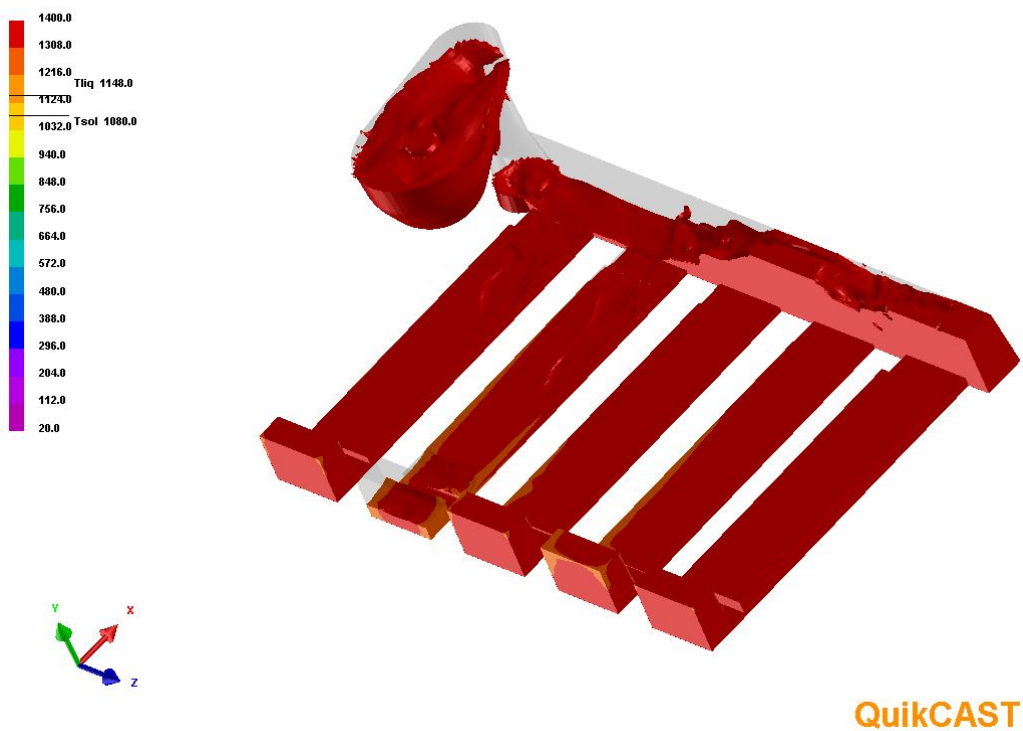
QuikCAST

Obr. 3.28. Simulace stávajícího modelového zařízení (víření taveniny)

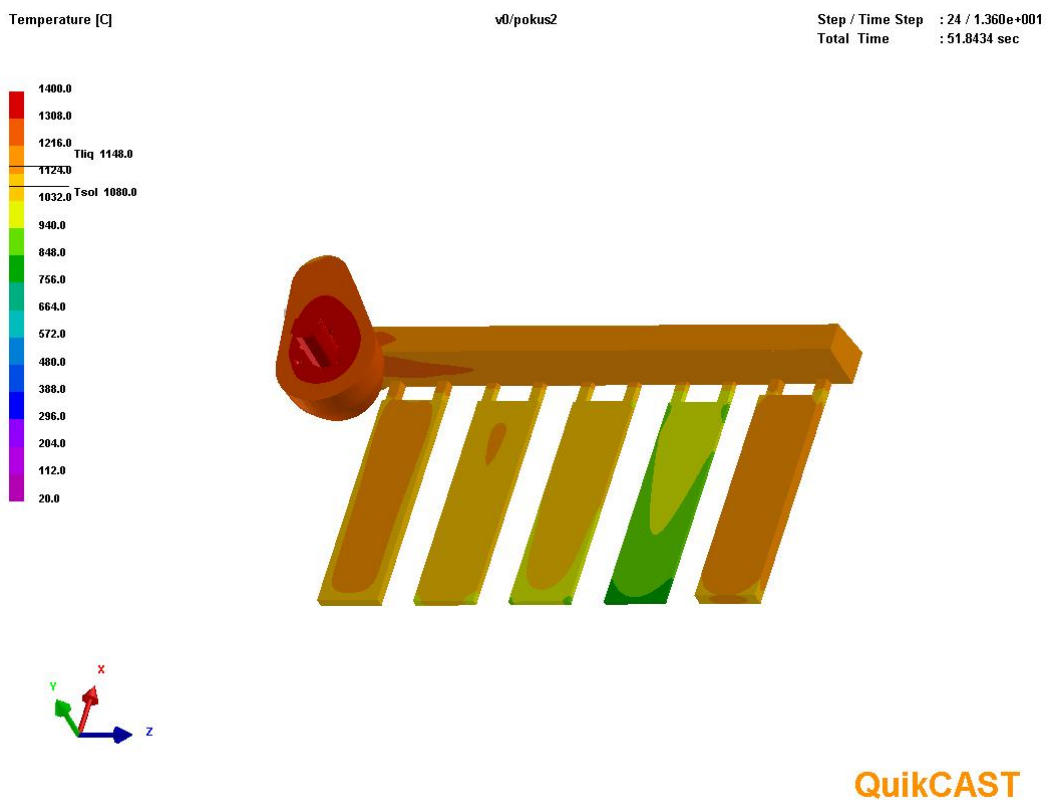


QuikCAST

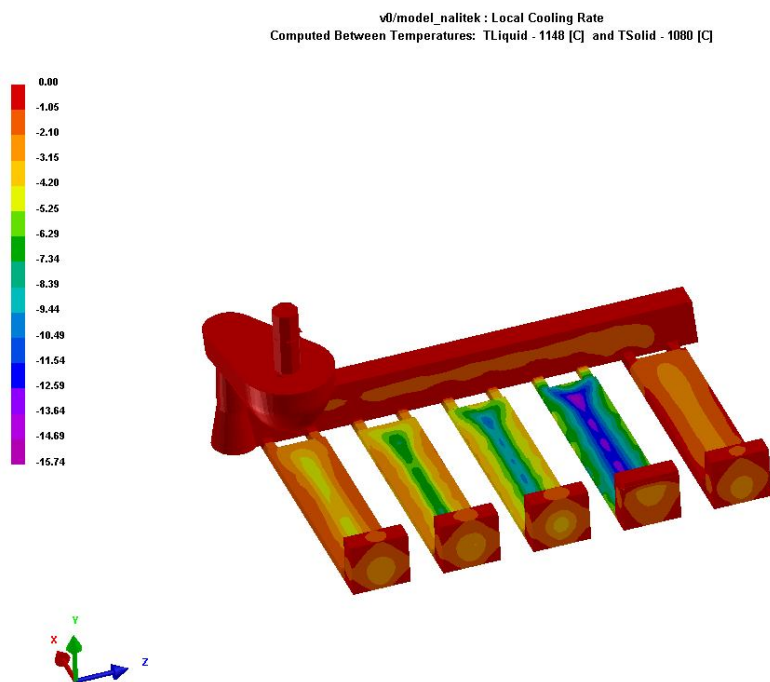
Obr. 3.29. Simulace stávajícího zařízení s přidáním nálitku (víření taveniny)



Obr. 3.30. Simulace upravených zářezů a přidání nálitků (víření taveniny)

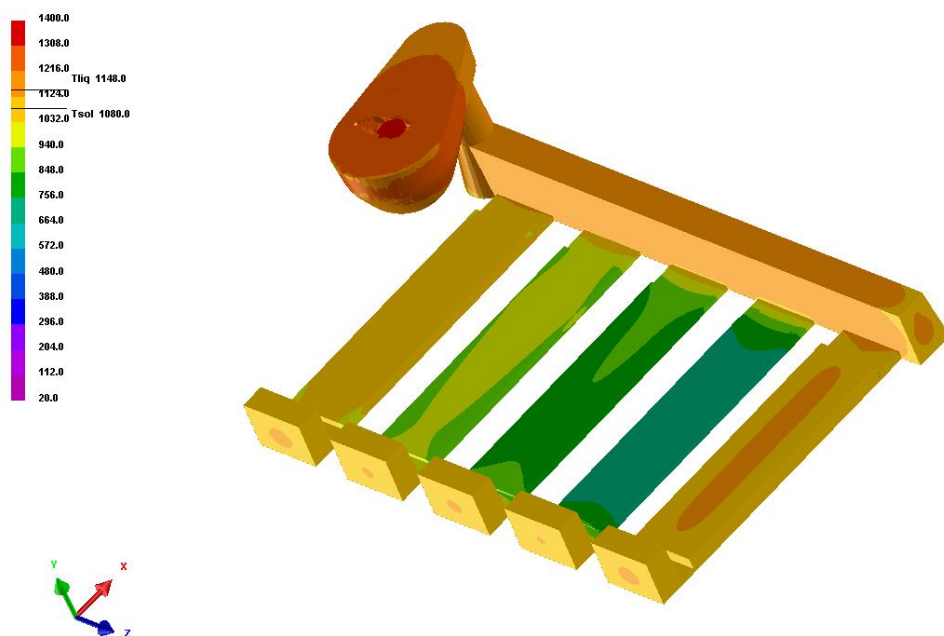


Obr. 3.31. Simulace stávajícího modelového zařízení (tepelné uzly)



QuikCAST

Obr. 3.32. Simulace stávajícího zařízení s přidáním nálitku (tepelné uzly)



QuikCAST

Obr. 3.33. Simulace upravených zářezů a přidání nálitků (tepelné uzly)



4. DISKUZE ZJIŠTĚNÝCH VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této diplomové práci přináší dílčí informace o možnostech výroby do jisté míry specifické výroby litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku. S tímto typem litiny v našich slévárnách nejsou zkušenosti. Prvními výrobci této litiny jsou L. E. BJÖRKEGREN a K. HAMBERG [8], kteří se zabývali vývojem pro automobilový průmysl, kde se využívají materiály, které vykazují vysokou hodnotu tažnosti. Tato vlastnost je důležitá pro zvýšenou bezpečnost osádky automobilů. Používají se materiály, které při nárazu pohltí velké množství energie, čím se zdeformují, avšak nesmí dojít k jejich destrukci. K těmto materiálům se řadí také některé typy litiny s kuličkovým grafitem. L. E. BJÖRKEGREN a K. HAMBERG [8] se tímto vývojem začali zabývat koncem 90. let minulého století. Začali vyvíjet litinu s kuličkovým grafitem pro automobilový průmysl, která měla splňovat nejen potřebnou tažnost, ale i obrobitelnost, jak u silných, tak i tenkých partií odlitků. To lze zajistit přítomností vyššího obsahu křemíku od 3,2 do 3,8 % křemíku. Výsledky jeho výzkumu byly již začleněny do ISO 1083:2004 (E). Tato litina se vyznačuje pevností cca 500 MPa, tvrdostí 185 až 215 HB a minimální tažností 10 %, pro odlitky tuhnoucí s tloušťkou stěny ≤ 30 mm. Problém je však tyto podmínky splnit při výrobě odlitků s tloušťkou stěn cca 3 mm.

V této souvislosti probíhal i výzkum na našem pracovišti KSP – FS, Technické univerzity v Liberci a v roce 2009 jsem v rámci tohoto projektu řešil bakalářskou práci. Největším problémem je zabezpečení metalurgických podmínek přípravy taveniny litiny s ohledem na stanovení množství kovové vsázky v souvislosti s vhodným množstvím a typem modifikátoru a očkovačla. Tak postupem doby řešení této problematiky byly vypracovány metalurgické zásady výroby litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku pro automobilový průmysl. Pro kovovou vsázku je nutné použít surové železo pod názvem Sorelmetal, vhodné množství očkovačla ve formě FeSi75, což je zdroj pro vyšší množství křemíku, dále očkovačlo, které je nutno dávat do pánve např. ve dvou fázích. Zanedbatelné není také určení a typ modifikátoru. V případě výzkumu na našem pracovišti byl použit modifikátor KVZ a MgFeSi. V mém případě řešení diplomové práce byla vsázka zaměřena na určení Sorelmetal a určitého poměru vratu, tj. litiny s kuličkovým grafitem, dále na uplatnění vhodného množství FeSi75 jako zdroje křemíku. Jako očkovačlo bylo použito různé množství Superssedu a bylo voleno různé množství modifikátoru MgFeSi.



Výzkum prováděný s litinou s kuličkovým grafitem potvrzuje, že tento materiál z metalurgického hlediska nevyžaduje žádná zvláštní metalurgická opatření. Jediným rozdílem oproti běžně vyráběným jakostem litiny s kuličkovým grafitem je pouze vsázkový poměr běžných surovin a jejich vysoká kvalita s pečlivým uvážením použití vratných odpadů. Při dodržení těchto zásad, jež platí i pro běžnou výrobu litiny s kuličkovým grafitem, a při dodržování předpisů normy *ISO 108:2004* týkajících se limitních obsahů prvků potlačujících feritickou základní kovovou hmotu, není důvod ke vzniku problémů při výrobě tohoto materiálu. Pro jeho výrobu, tj. LKG s vyšším obsahem křemíku je nutné, aby vyráběná litina obsahovala max. 3,9 % Si. K její výrobě lze doporučit středofrekvenční indukční pec a odlévací pánev (Sendwich) s kyselou vyzdívkou.

Pro tavicí pec o objemu taveniny 40 kg lze doporučit z výsledků měření tvrdosti (tab.3.9.) tavby číslo 2 až 5 (obsah Si 3,83%, 3,49%, 3,86%, 3,47% a 4,10%) obsah zbývajících prvků je v tabulce 3.7. . U taveb 2 až 5 se tvrdost pohybovala okolo 200 HB a rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou tvrdosti v tavbě u destiček 3 až 10 mm se pohybovala hodnota rozsahu okolo 20HB je tedy patrné, že zvyšující se obsah křemíku rozptýl tvrdosti snižuje. Protože tavba číslo 1 obsahovala pouze 2,70% Si a rozdíl mezi minimem a maximem byl 69 HB.

Z hlediska struktury velikosti a tvaru grafitu (tab. 3.8. a PŘÍLOHA 1), už výsledky nejsou tak jednoznačné. U taveb 1 až 5 převažoval kuličkový grafit rovnoměrně i nerovnoměrně zrnitý velikosti 8 až 7 což odpovídá velikosti 0 až 30 μ m, tavba číslo 6 obsahovala se vzrůstající tloušťkou stěny vysoký obsah červíkovitého grafitu až 70% , který je u LKG nežádoucí. Dalším hodnotícím kritériem byl obsah perlitu, kde pouze tavba číslo dva neobsahovala více jak 2% perlitu u destičky tloušťky 3mm. Tavby 1,3,4,6 obsahovali u destiček do 5 mm obsah perlitu do 30% a od tloušťky 7 do 10 mm obsah perlitu nepřesáhl 10%. Tavba číslo 6 obsahovala u destiček do 5mm až 60% perlitu a u destiček 7 až 10mm obsahovala do 30% perlitu.

Mez pevnosti a tažnost byla brána jako průměrná hodnota takže se jedná spíše o informativní veličiny a nemají vypovídající vlastnost o daném materiálu. Z hlediska pevnosti v tahu, kterou norma předepisuje pro stěny 15 až 30 mm mají vzorky zhotovené z Y bloků okolo 500MPa, výjimku tvoří tavby číslo 1 kde je pevnost v tahu $R_m = 430$ MPa a nejvyšší pevnost byla zjištěna u tavby číslo 2 kde dosahovala hodnoty $R_m = 570$ MPa. Tažnost všech vzorků z Y bloků přesáhla 20%. Tažnost a pevnost zkoušená u



destiček tloušťky 3 až 10 mm. Může být do velké míry ovlivněna porózitou materiálu v tomto ohledu, ale nebyli prováděny experimenty na zjištění porózy.

Z výsledku dále vyplývá, že obsah samotného křemíku nezaručí feritickou strukturu, ale musí se brát v úvahu i obsah ostatních prvků (tab.3.7.), které mají vliv na obsah perlitu jako je například Mn, Cu. Porovnáme-li dvě tavby 2 (3,43%C a 3,83%Si) a 4 (3,51%C a 3,86%Si) u kterých je obsah dvou hlavních prvků téměř identický, ale liší se obsah Cu a Mn tavba číslo 2 (0,011 % Cu a 0,010 % Mn) a tavba číslo 4 (0,033 % Cu a 0,180 % Mn) z metalografického hodnocení struktur, je patrné že tavba dva má obsah perlitu do 2% a tavba 4 obsahuje až 30% perlitu.

Shrnutím výše uvedených závěrů se jako nejvhodnější složení vsázky pro indukční pec jeví tavba číslo dva složená z 27 kg Sorelmetal a 1,1 kg FeSi75 tavenina byla před odlití očkovaná 0,16 kg FeSi75 a 0,11kg Superseed, pro modifikaci bylo použito 0,0043kg KVZ a 0,43 kg modifikátoru lamet 5504 (modifikátor na bázi Fe-Si-Mg s obsahem okolo 5,5 % Mg).

Výsledky všech měření byli více či méně ovlivněny, jelikož se jedná o provádění taveb s malým množstvím roztaveného kovu. Kde dochází k rychlému ochlazení taveniny a vlivem prodlev mezi jednotlivými operacemi zpracování taveniny (modifikace a očkování) mohlo dít k poklesu teploty pod 1400°C, což vede ke zvyšování množství perlitu v tenkých destičkách zkušebních odlitků.

Výsledky simulací provedených pomocí programu QUICK CAST ukázaly, že stávající řešení lící soustavy je nevhodné s ohledem na porózu ve zkušebních destičkách. Zásadní změnou je místo podtlakové lící soustavy volit přetlakovou a přepočítat tak velikosti zářezů pro jednotlivé destičky a zbylé rozměry lící soustavy. K ovlivnění výsledku došlo z části zadaným materiálem jež odpovídal chemickým složením běžné EN-GJS 500-7. Pro nastavení vlastního chemického složení je zapotřebí licence jež katedra strojírenské technologie TUL nevlastní .



5. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo shrnutí a zpracování výsledků pokusných taveb odlitků z litiny s kuličkovým grafitem a s vyšším obsahem křemíku. A současně stanovit tak podmínky pro opakovatelnost těchto výsledků. Pro úspěšnou výrobu litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si o požadovaných mechanických vlastnostech.

Diplomová práce je rozdělena do dvou základních částí a to rešeršní a experimentální. První část shrnuje dosud zjištěné poznatky o výrobě LKG. V druhé části je postupně popsán postup výroby LKG v poloprovozních podmínkách slévárny na katedře KSP. Kde bylo zhotoveno několik taveb kde se zkoušeli různé kombinace vsázkového materiálu, měnicí se obsah dvou základních prvků a to křemíku a uhlíku a v neposlední řadě množství modifikátoru a postup očkování. Zkušební tavby se skládaly ze zkušebních destiček, tyčí a Y bloků. U těchto zkušebních vzorků se vyhodnocovala tvrdost, struktura a mechanické vlastnosti. Na základě vyhodnocení dílčích pokusů lze stanovit několik podmínek, které musí být dodrženy, aby bylo dosaženo žádaných výsledků:

1. Základem výroby LKG s vyšším obsahem Si je nutný pečlivý výběr vsázky tak, aby obsah škodlivých prvků S a P byl co nejnižší. Jedním z požadavků je i feritická struktura, proto se musí sledovat obsah prvků, jako Mn, Cu, Sn, Cr, a další karbidotvorné prvky a naopak složit vázku tak, aby byl dodržen zvýšený obsah Si, ke zvyšování obsahu křemíku ve vsázce sloužilo očkovaadlo FeSi75.
2. Tavicí agregát ovlivňuje zárodečný stav taveniny a to tím že čím je vyšší teplota tavení tím se zárodečný stav zhoršuje. Vhodná je proto indukční středofrekvenční pec díky řízení teploty a tak taveninu ohřát na požadovanou teplotu před přelitím do pánve s modifikátorem a očkovaadlem tak aby proběhla modifikace a očkování. Jakmile tyto děje proběhnou je nutné začít odlévat, kvůli odeznívajícím účinkům modifikace a očkování a poklesu teploty taveniny.
3. Konstrukce formy je rovněž důležitá pro dosažení kvalitních odlitků. Jedná se zejména o způsobu provedení vtokové soustavy s ohledem na vyplnění dutiny. A při následném tuhnutí a chladnutí zachování směru tuhnutí od nejvzdálenějších míst odlitku ke vtoku, popřípadě nálitku. A zamezit vzniku tepelných uzlů, které jsou místem vzniku ředin



a porózity. A v neposlední řadě úprava líce formy pro zamezení vzniku povrchových vad odlitku.

4. Posledním hodnotícím kritériem vždy bývají náklady spojené s výrobou. Tato práce se touto otázkou nezabývá, jelikož se odlévali pouze zkušební vzorků které se následně vyhodnocovaly, nikoliv konkrétní součásti, u kterých by se spočítaly náklady na jeden odlitek pro daný způsob výroby.

Ekonomické hodnocení práce nebylo provedeno, neboť se zatím jedná pouze o poloprovozní podmínky výroby této litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku a odzkoušení množství a typů modifikátorů a očkovaadel v souvislosti se složením vsázky.

Pokud bude tato problematika dále řešena v diplomových pracích, doporučuji, aby byla pozornost věnována vsázkovému materiálu a to sledování nejvyššího možného množství vratného materiálu z výroby odlitků z LKG a LKG s vyšším obsahem křemíku pro přípravu taveniny. Při dodržení podmínek: feritická struktura se zrnitým grafitem velikosti 8 až 6 pro zkoušené destičky 3 až 10 mm



6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÁ, I.: Teorie Slévání, 2. díl Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin, Technická Universita v Liberci březen 2007.
- [2] PLUHAŘ, J.: Nauka o materiálu , 1. vyd. SNTL, Praha 1989.
- [3] PODRÁBSKÝ, T., POSPÍŠILOVÁ, S.: Studijní opora " Struktura a vlastnosti grafitických litin ", Vysoké učení technické v Brně 16.11.2006.
- [4] ŠMRHA, J.: Vliv zvýšeného obsahu křemíku na mechanické vlastnosti tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. [Doktorská práce]. KSP – FS, TU v Liberci 2009.
- [5] TVRZNÍK, P.: Metalurgické vlivy na výrobu tenkostěnných odlitků pro automobilový průmysl z LKG s vyšším obsahem křemíku. [Diplomová práce]. KSP – FS, TU v Liberci, 2009.
- [6] ČSN 42 0461: Hodnocení metalografické struktury litin, ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Praha, 1.12. 1975.
- [7] BOUCNÍK, P.: Vliv doby na izotermické transformace na únavové vlastnosti bainitické tvárné litiny [Diplomová práce], VUT v Brně 1996.
- [8] L. E. BJÖRKEGREN a K. HAMBERG: Ductile iron with better machinability compared to conventional grades. Foundryman - Technical paper, Ductile iron, December 1998 p. 386 to 391.
- [9] KEITH MILIS: Symposium on Ductile Cast Iron, 2003
- [10] KERSAY, S.: tvárná litina. 1. vyd. Fompex, s.r.o., Trenčín, 1995
ISBN 80-967498-8-9
- [11] Plachý J., Němec M., Bednář B.: Teorie slévání. ČVUT Praha leden 1990
- [12] Roučka J.: Metalurgie litin, VUT Brno 1998, ISBN 80-214-1263-1.
- [13] Řídký O.: Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku. [Bakalářská práce]. KSP – FS, TU v Liberci, 2009.
- [14] Roučka J.: Prezentace Metalurgie litin.
- [15] Scania.cz (prospekty ke stažení listopad 2011).

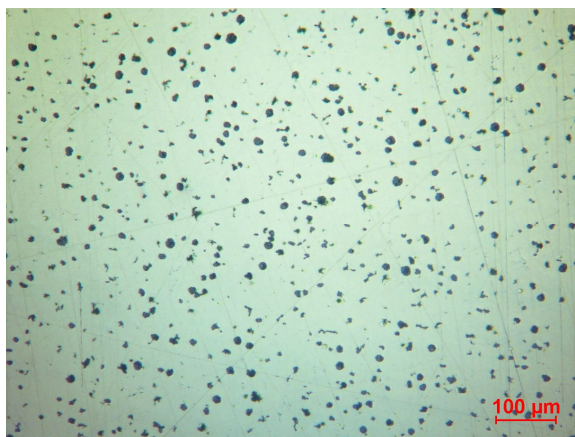


Přílohy

PŘÍLOHA 1

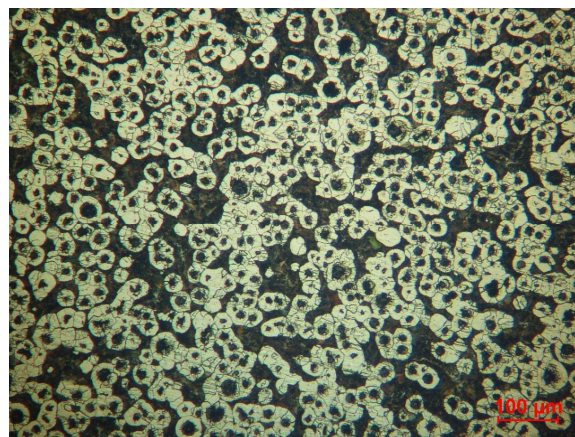
Tavba číslo1

Destička 3 mm



NELEPTÁNO

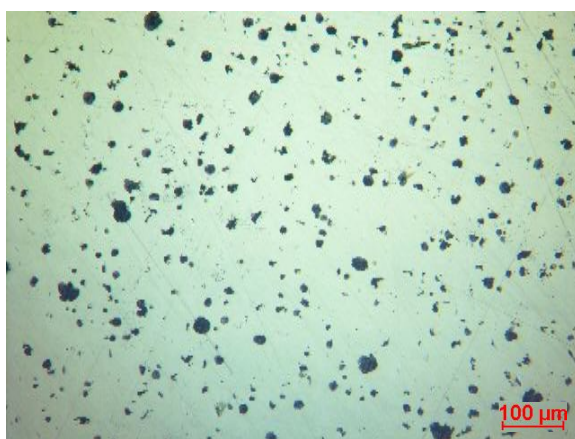
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

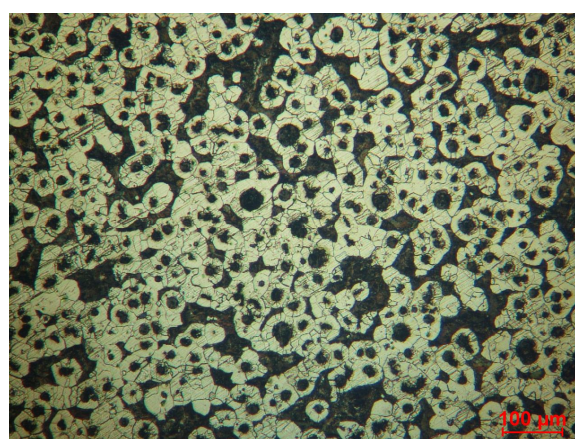
100x

Destička 4 mm



NELEPTÁNO

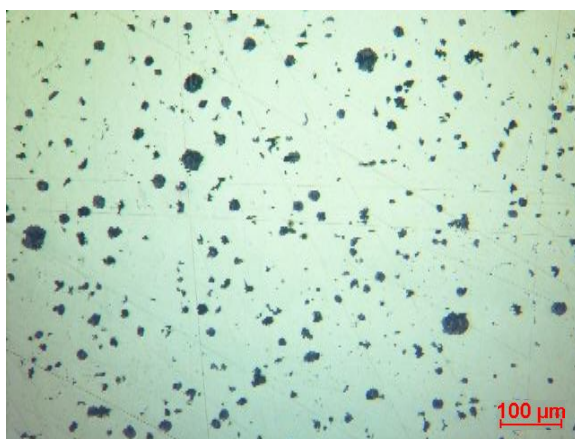
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

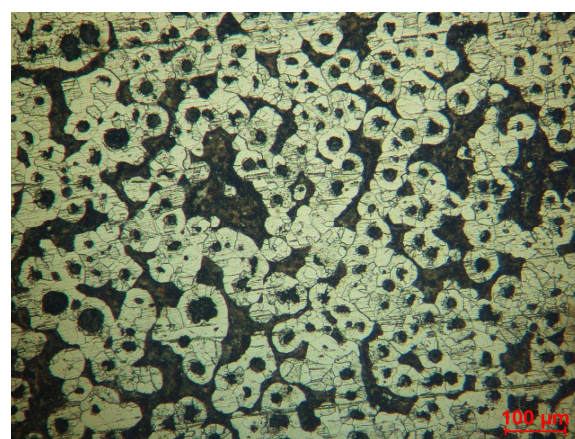
100x

Destička 5 mm



NELEPTÁNO

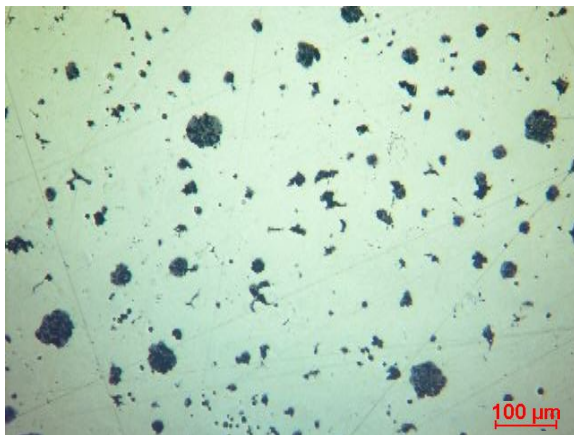
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

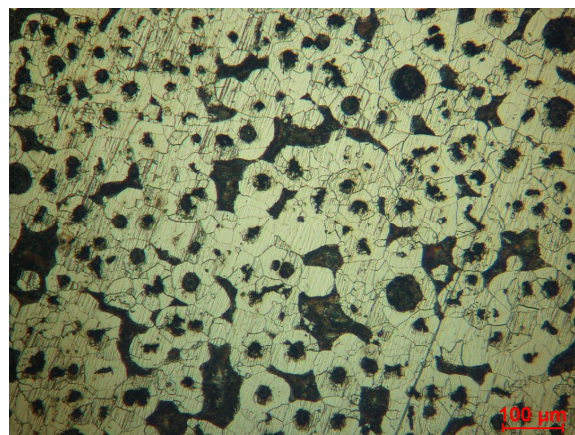
100x

Destička 7 mm



NELEPTÁNO

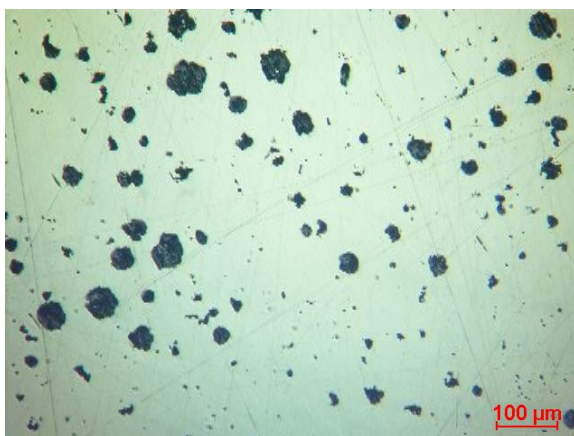
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

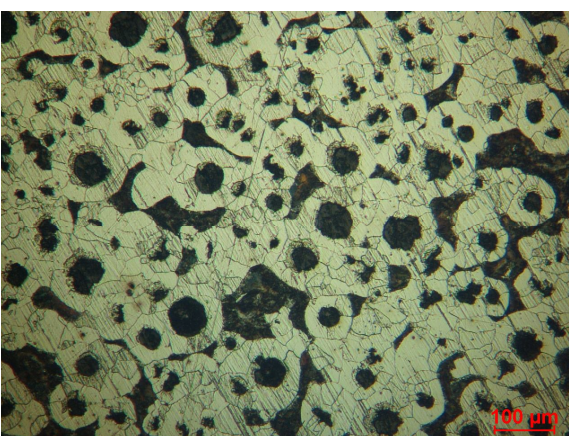
100x

Destička 10 mm



NELEPTÁNO

100x

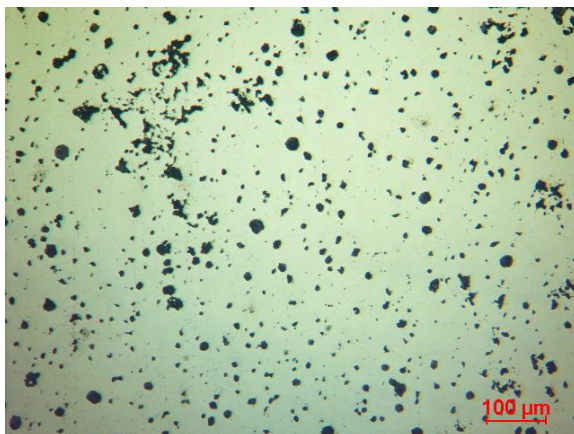


LEPTÁNO NITAL 2,5

100x

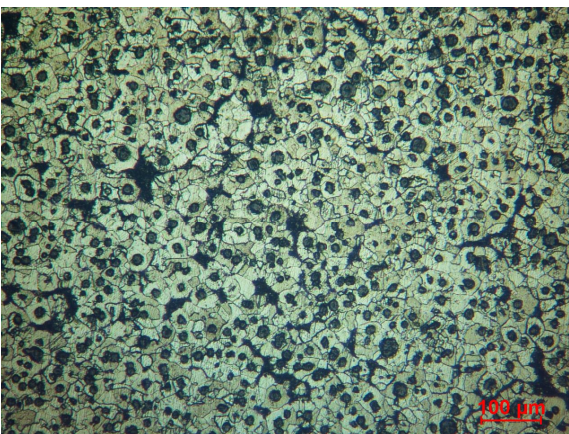
Tavba číslo 2

Destička 3 mm



NELEPTÁNO

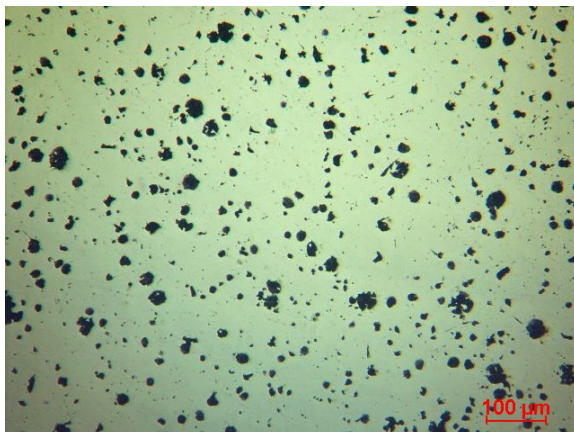
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

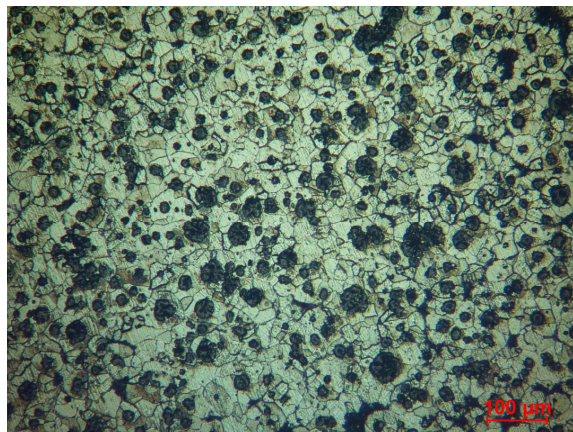
100x

Destička 4 mm



NELEPTÁNO

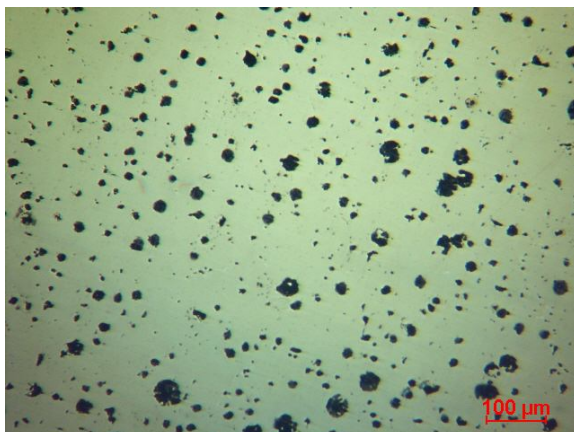
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

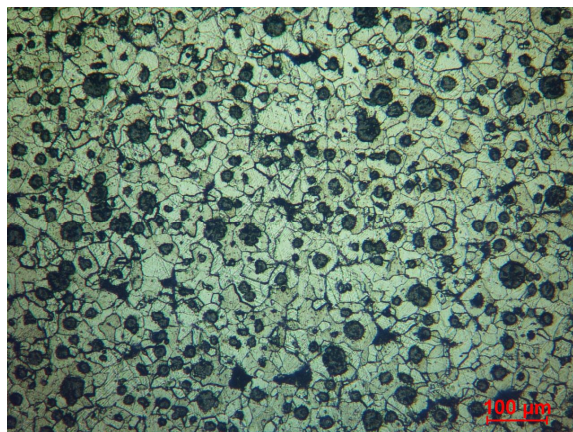
100x

Destička 5 mm



NELEPTÁNO

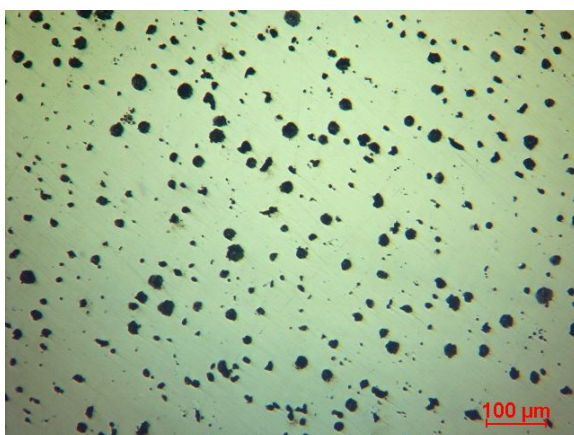
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

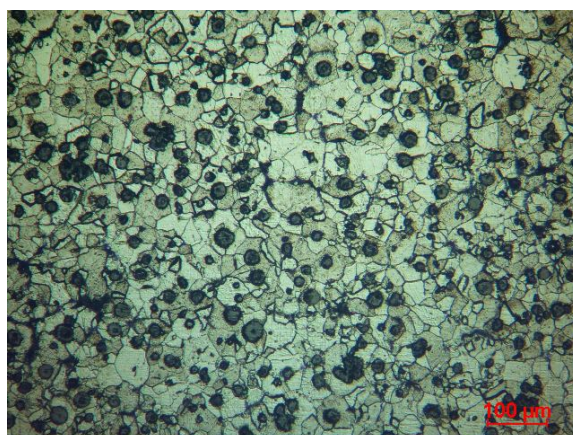
100x

Destička 7 mm



NELEPTÁNO

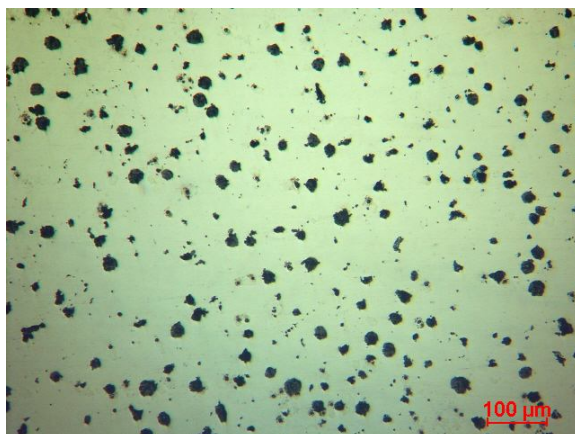
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

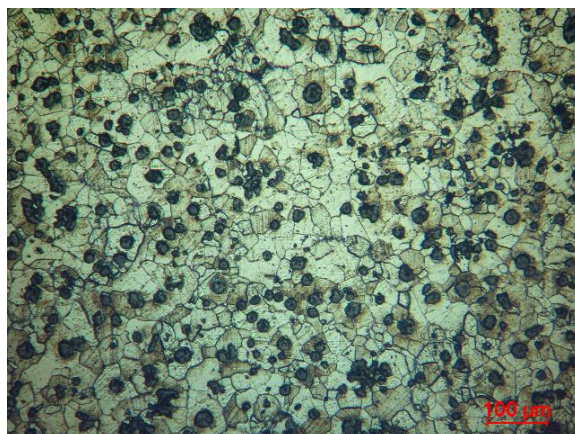
100x

Destička 10 mm



NELEPTÁNO

100x

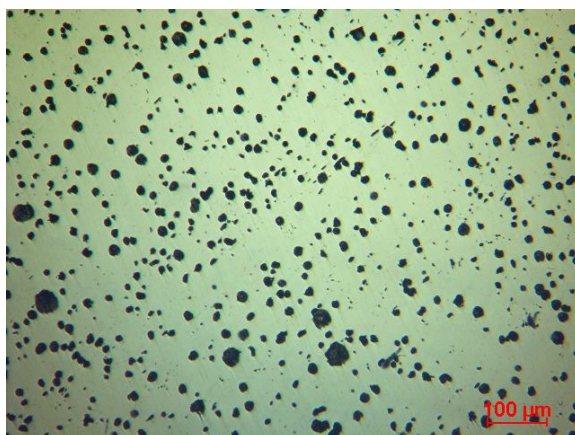


LEPTÁNO NITAL 2,5

100x

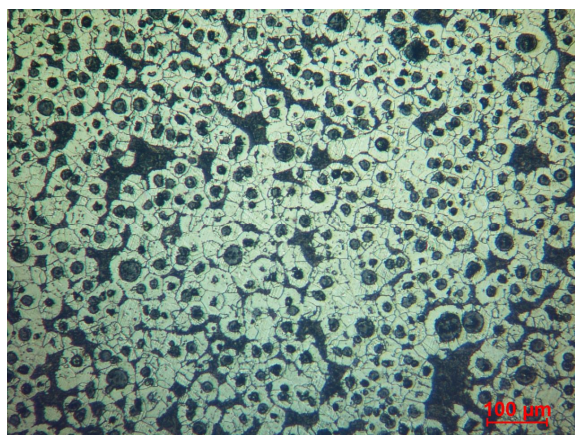
Tavba číslo 3

Destička 3 mm



NELEPTÁNO

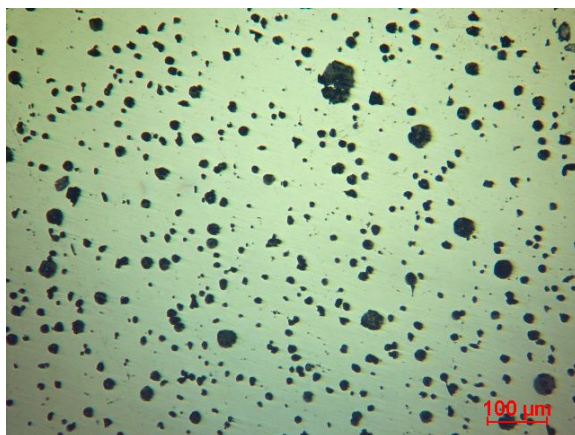
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

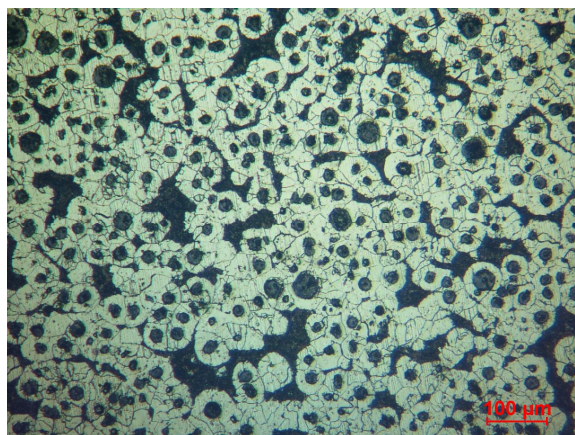
100x

Destička 4 mm



NELEPTÁNO

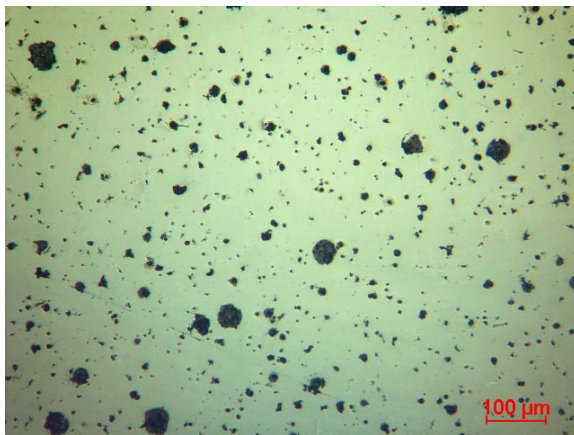
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

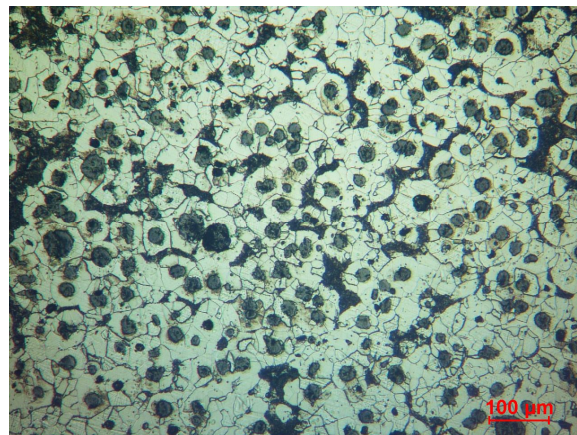
100x

Destička 5 mm



NELEPTÁNO

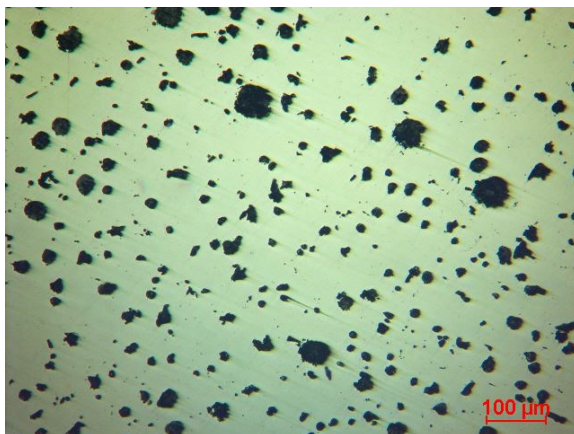
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

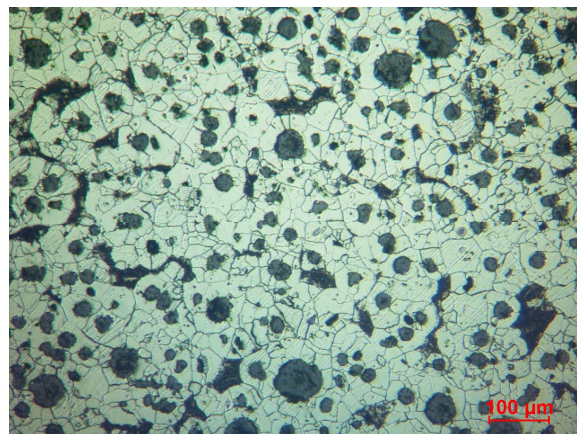
100x

Destička 7 mm



NELEPTÁNO

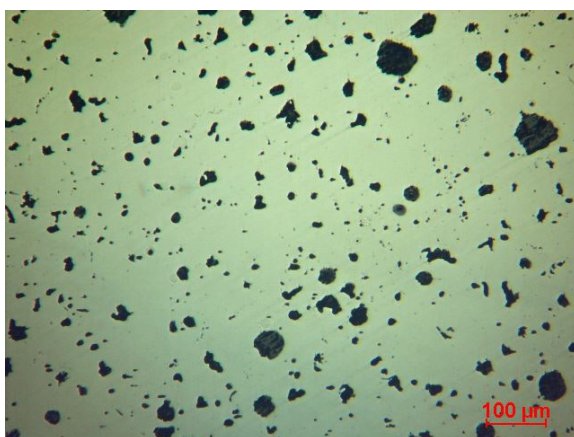
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

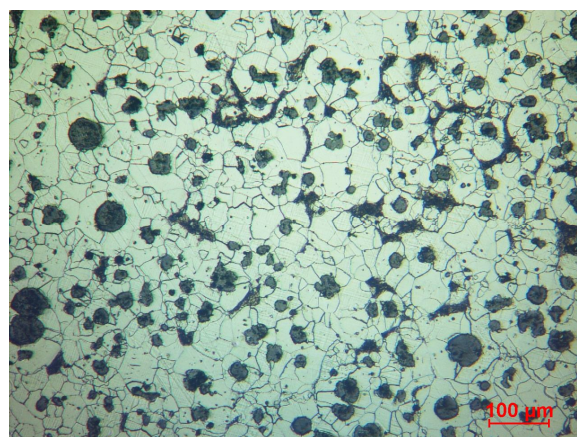
100x

Destička 10 mm



NELEPTÁNO

100x

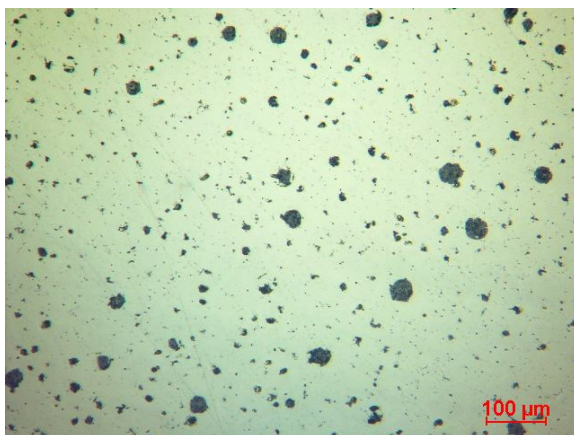


LEPTÁNO NITAL 2,5

100x

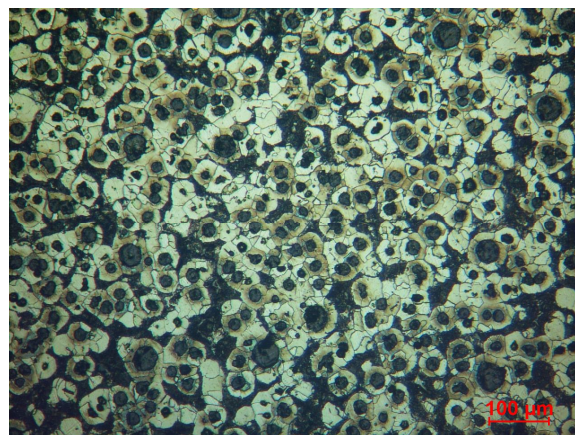
Tavba číslo 4

Destička 3 mm



NELEPTÁNO

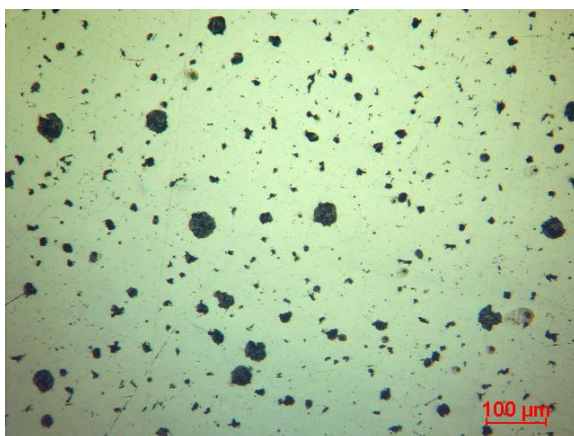
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

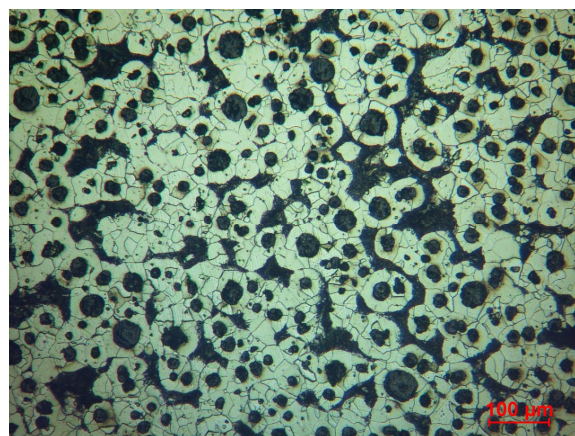
100x

Destička 4 mm



NELEPTÁNO

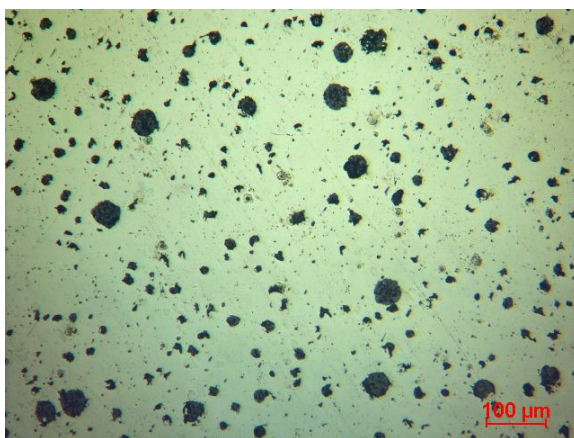
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

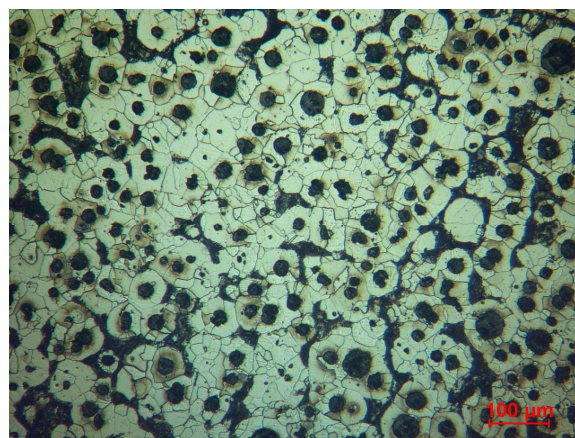
100x

Destička 5 mm



NELEPTÁNO

100x

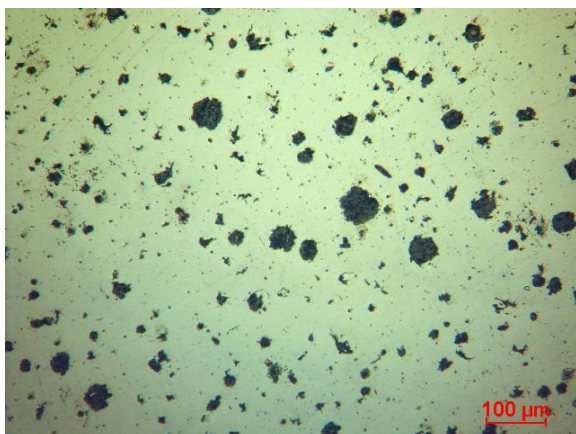


LEPTÁNO NITAL 2,5

100x

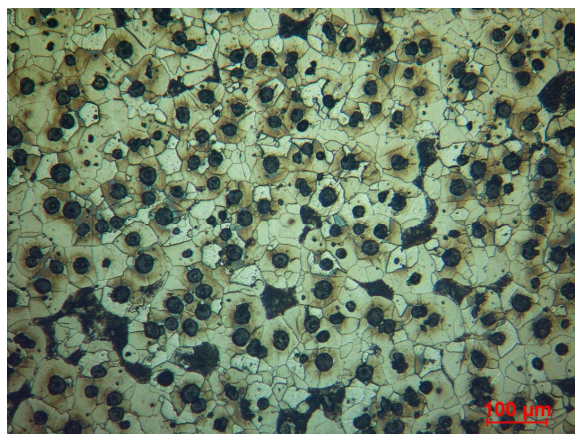


Destička 7 mm



NELEPTÁNO

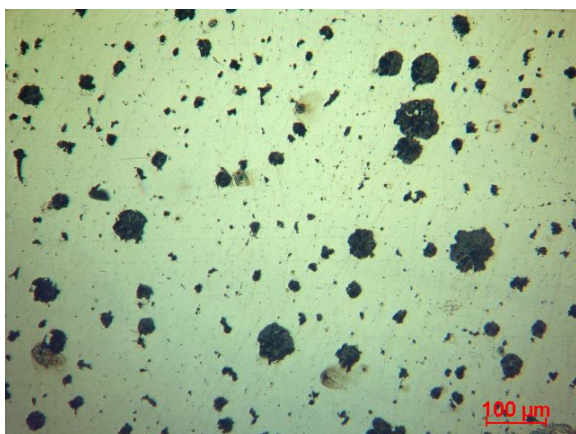
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

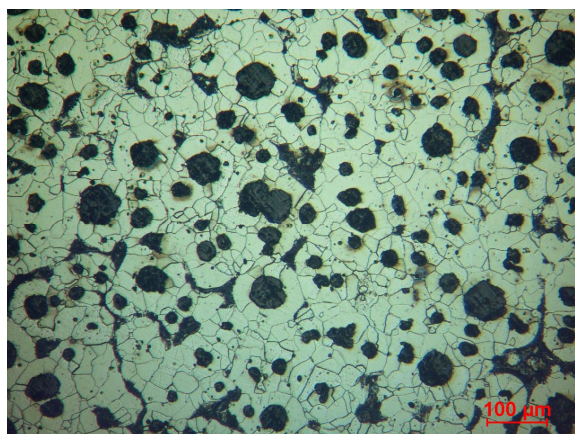
100x

Destička 10 mm



NELEPTÁNO

100x

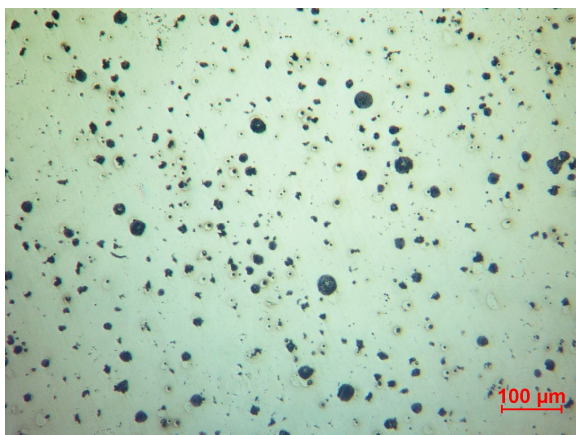


LEPTÁNO NITAL 2,5

100x

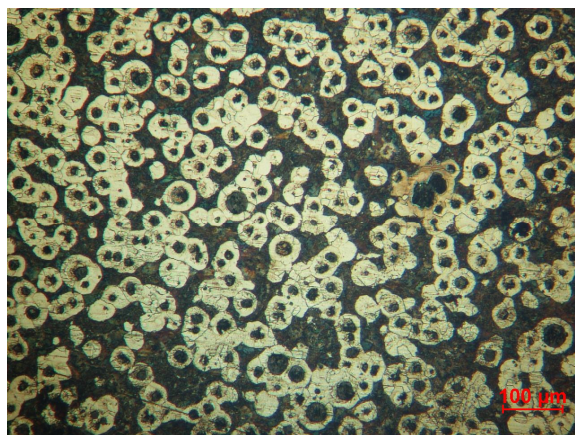
Tavba číslo 5

Destička 3 mm



NELEPTÁNO

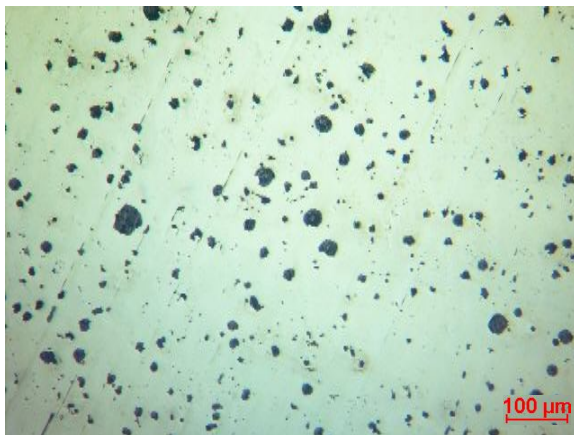
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

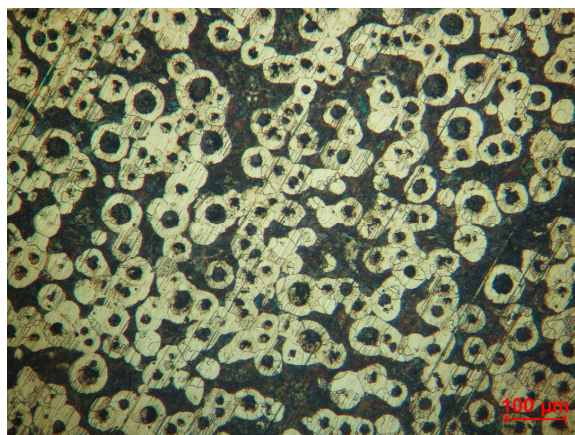
100x

Destička 4 mm



NELEPTÁNO

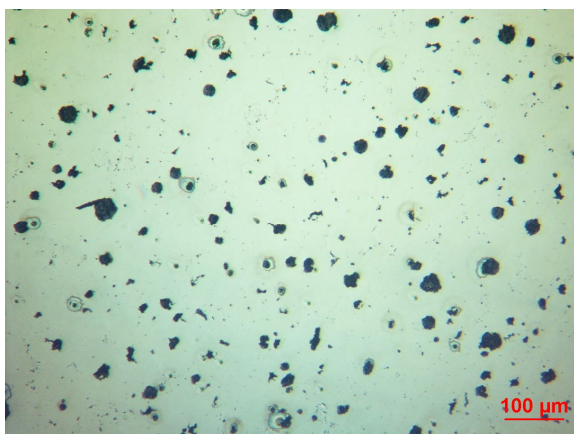
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

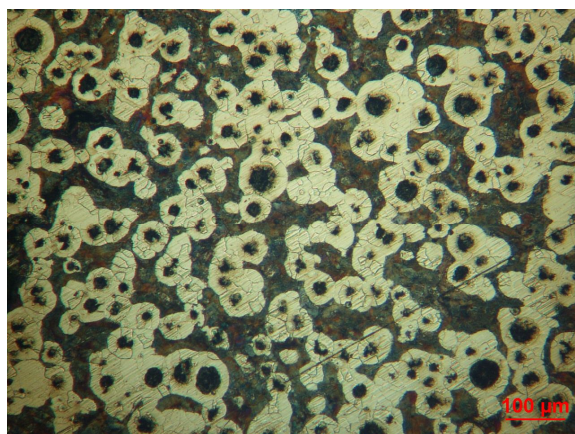
100x

Destička 5 mm



NELEPTÁNO

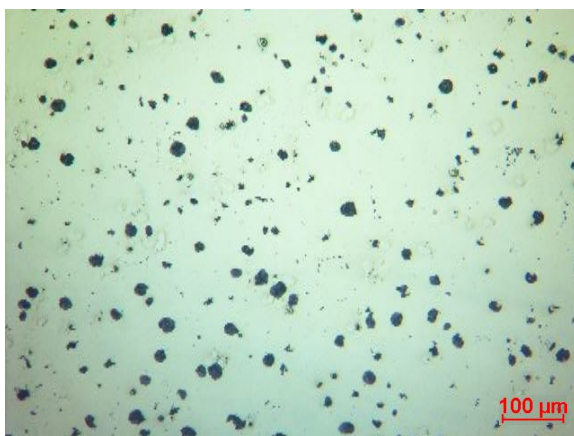
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

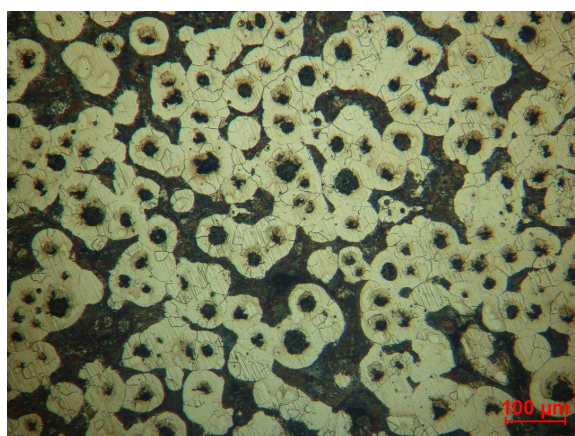
100x

Destička 7 mm



NELEPTÁNO

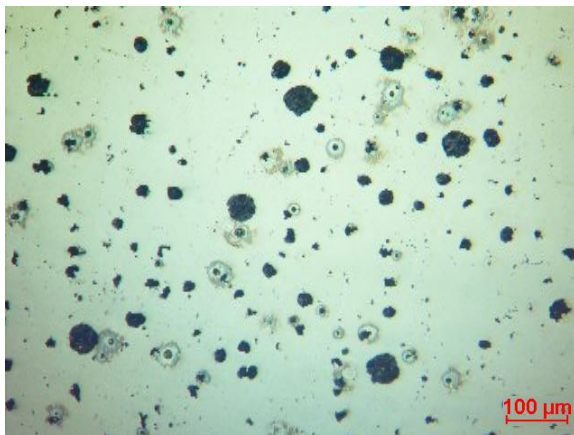
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

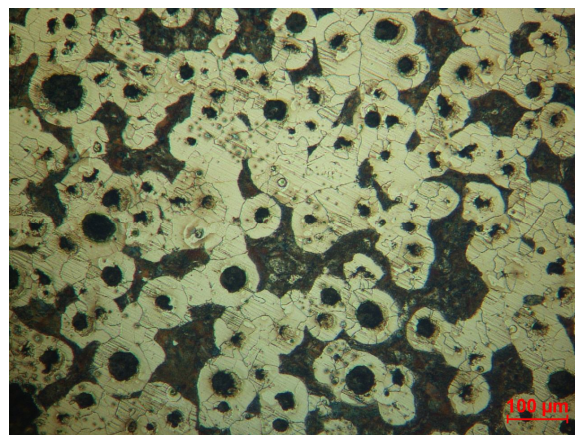
100x

Destička 10 mm



NELEPTÁNO

100x

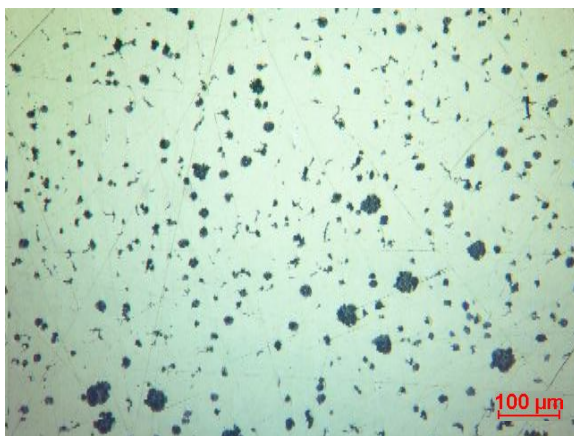


LEPTÁNO NITAL 2,5

100x

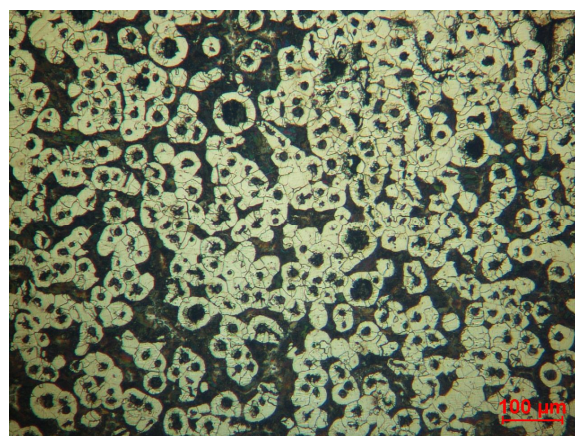
Tavba číslo 6

Destička 3 mm



NELEPTÁNO

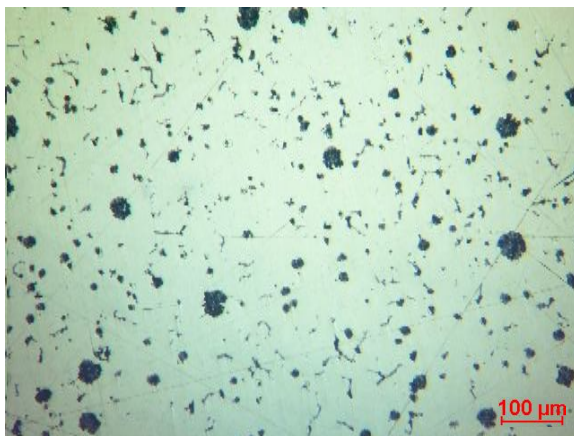
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

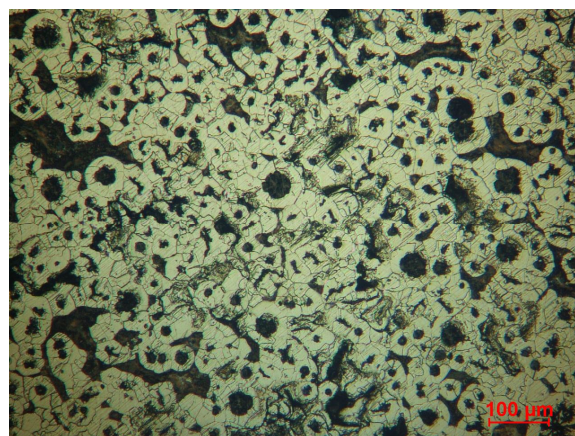
100x

Destička 4 mm



NELEPTÁNO

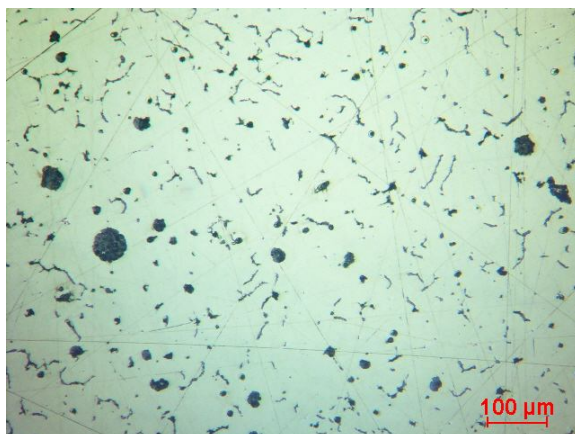
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

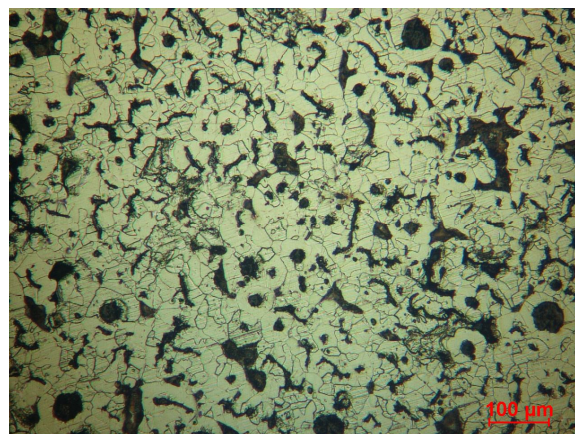
100x

Destička 5 mm



NELEPTÁNO

100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

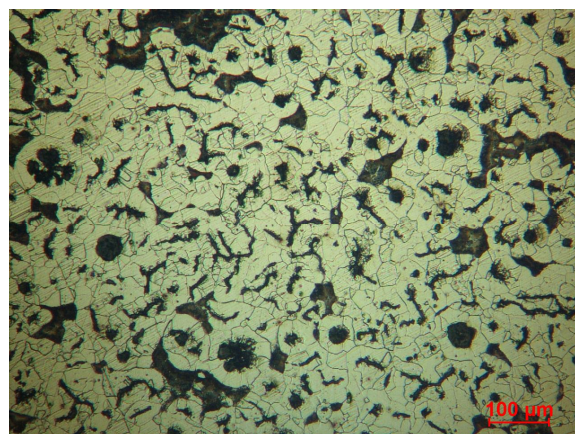
100x

Destička 7 mm



NELEPTÁNO

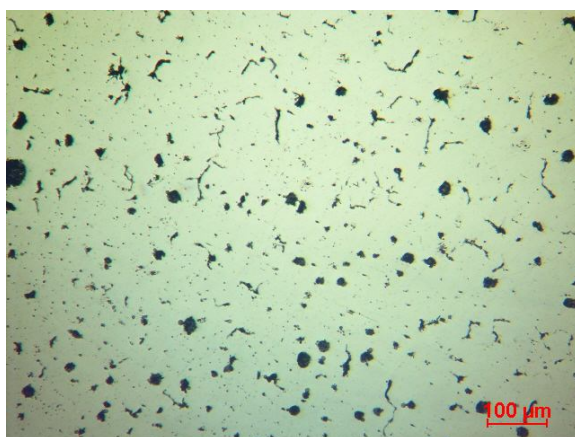
100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

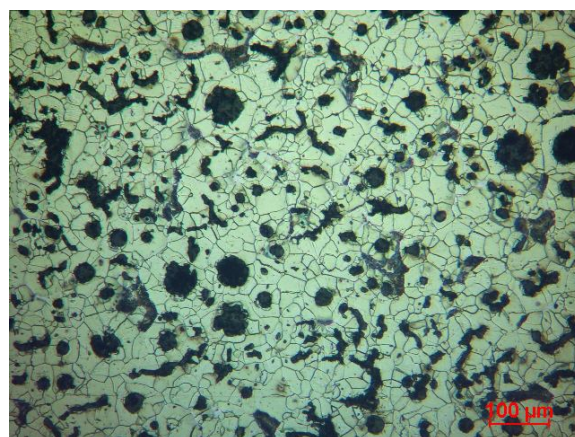
100x

Destička 10 mm



NELEPTÁNO

100x



LEPTÁNO NITAL 2,5

100x

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická universita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 25. 2012

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully Aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant

Date: 25.5. 2012

Signature: